

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерний навчально-науковий інститут**

**А.О. Ніконова, З.А. Ніконова, О.Ю.Небеснюк**

**МАТЕРІАЛИ ТА КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

Конспект лекцій  
для здобувачів вищої освіти бакалавра  
спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка»  
освітньо-професійної програми  
«Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено  
Вченою радою ЗНУ  
Протокол № 11 від 23.06 2021

Запоріжжя

2021

УДК 621.38

НЗ77

Ніконова А.О., Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Матеріали та компоненти електронної техніки: конспект лекцій для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»: ЗНУ, 2021. 80с.

Конспект лекцій розроблено для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка». Запропонований матеріал призначено для самостійної підготовки до лабораторних та практичних занять, виконання індивідуальних завдань.

Рецензент

*В.Л. Коваленко*, доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та енергоефективності

Відповідальний за випуск

*Т.В. Критська*, доктор технічних наук, професор кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем

## Зміст

Вступ	4
1 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ.....	5
1.1 Класифікація речовин за магнітними властивостями.....	5
1.2 Процеси при намагнічуванні феро- і феримагнетиків .....	9
1.3 Поводження феромагнетиків у змінних магнітних полях.....	14
1.4 Доменні структури в тонких магнітних плівках.....	17
1.5 Класифікація магнітних матеріалів.....	18
1.6 Магнітом'які матеріали для постійних і низькочастотних магнітних полів.....	20
1.7 Магнітом'які високочастотні матеріали.....	23
1.8 Магнітні матеріали спеціалізованого призначення.....	27
1.9 Магнітотверді матеріали.....	30
2 РЕЗИСТОРИ.....	39
2.1 Основні параметри резисторів.....	39
2.2 Класифікація резисторів.....	42
2.3 Резистори постійного опору.....	42
2.4 Терморезистори.....	44
2.5 Варістори.....	46
3 КОНДЕНСАТОРИ.....	48
3.1 Класифікація конденсаторів.....	49
3.2 Маркування конденсаторів.....	57
4 ІНДУКТИВНІ КОМПОНЕНТИ.....	65
4.1 Котушки індуктивності.....	65
4.2 Дроселі.....	76
ЛІТЕРАТУРА.....	34

## ВСТУП

Конспект лекцій «Матеріали та компоненти електронної техніки» розроблені для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»

**Метою** викладання навчальної дисципліни «Матеріали та компоненти електронної техніки» є надання студентам поглиблених уявлень властивостей матеріалів та компонентів електронної техніки

Основними **завданнями** викладання дисципліни «Матеріали та компоненти електронної техніки» є надання студентам знань фізичних властивостей та експлуатаційних параметрів сучасних матеріалів, що використовуються при виготовленні мікро- та наноелектроніки та компонентів електронних пристроїв

Вивчення навчальної дисципліни забезпечує набуття студентами наступних загальних та спеціальних компетентностей:

- здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, під час професійної діяльності у галузі мікро- та наносистемної техніки, або у процесі навчання, що передбачає застосування теорій та методів автоматизації та електроніки;
- здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.
- здатність розв'язувати інженерні задачі в галузі мікро- та наносистемної техніки з урахуванням всіх аспектів розробки, проектування, виробництва, експлуатації та модернізації.
- здатність розуміти та застосовувати технологічні принципи виробництва, випробування, експлуатації та ремонту мікро- та наносистемної техніки та біомедичного обладнання.
- здатність використовувати знання з оптичної аналогової та цифрової схемотехніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та геліоелектроніки

# 1 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

## 1.1 Класифікація речовин за магнітними властивостями

Будь-яка речовина, будучи поміщеною у магнітне поле, здобуває деякий магнітний момент  $\bar{M}$ . Магнітний момент одиниці об'єму  $J_M$  речовини називають **намагніченістю**  $\bar{J}_M = \bar{M}/V$ , де  $V$ - об'єм, м<sup>3</sup>.

При нерівномірному намагнічуванні тіла  $\bar{J}_M = d\bar{M}/dV$ .

Намагніченість є векторною величиною; в ізотропних тілах вона спрямована або паралельно, або антипаралельно напруженості магнітного поля  $\bar{H}$ . Намагніченість виражається в одиницях напруженості магнітного поля (А/м) і пов'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням  $\bar{J}_M = \chi_M \cdot \bar{H}$ , де  $\chi_M$  – безрозмірна величина, що характеризує здатність даної речовини намагнічуватися в магнітному полі й називана **магнітною сприйнятливістю**. Магнітна сприйнятливість чисельно дорівнює намагніченості при одиничній напруженості поля. Крім об'ємної магнітної сприйнятливості  $\chi_M$  іноді використовують поняття питомої й молярної магнітних сприйнятливостей, які відносять відповідно до одиниці маси або до моля речовини.

Намагнічене тіло, що перебуває в зовнішньому полі, створює власне магнітне поле, що в ізотропних матеріалах спрямовано паралельно або антипаралельно зовнішньому полю. Тому сумарна магнітна індукція  $\bar{B}$  в речовині визначається алгебраїчною сумою індукції зовнішнього й власного полів:

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_i = \mu_0 \bar{H} + \mu_0 \bar{J}_M, \quad (1.1)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна.

З (5.1) і (5.2) знаходимо

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} (1 + \chi_M) = \mu_0 \mu \bar{H} \quad (1.2)$$

де  $\mu = 1 + \chi_M$  – **відносна магнітна проникність**, що показує у скільки разів магнітна індукція  $\bar{B}$  поля в даному середовищі більше, ніж магнітна індукція  $\bar{B}_0$  у вакуумі.

Першопричиною магнітних властивостей речовини є внутрішні приховані форми руху електричних зарядів, які є елементарними круговими

струмами, що мають магнітні моменти. Такими струмами є електронні спини й орбітальне обертання електронів в атомах. Магнітні моменти протонів і нейтронів приблизно в тисячу разів менші за магнітний момент електрона. Тому магнітні властивості атома визначаються цілком електронами, а магнітним моментом ядра можна знехтувати.

За реакцією на зовнішнє магнітне поле й характером внутрішнього магнітного впорядкування всі речовини в природі можна підрозділити на п'ять груп: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики й феримагнетики.

До **діамагнетиків** відносять речовини, у яких магнітна сприйнятливість негативна й не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Діамагнетизм обумовлений невеликою зміною кутової швидкості орбітального обертання електронів при внесенні атома в магнітне поле. Діамагнітний ефект є проявом закону електромагнітної індукції на атомному рівні.

До діамагнетиків належать інертні гази, водень, азот, багато рідин (вода, нафта і її похідні), ряд металів (мідь, срібло, золото, цинк, ртуть, галій і ін.), більшість напівпровідників (кремній, германій, сполуки  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ) і органічних сполук, лужно-галоїдні кристали, неорганічні стекла й ін. Діамагнетиками є всі речовини з ковалентним хімічним зв'язком і речовини в надпровідному стані. Чисельне значення магнітної сприйнятливості діамагнетиків становить  $-(10^{-6} \dots 10^{-7})$ . Оскільки діамагнетики намагнічуються проти напрямку поля, для них  $\mu < 1$ . Однак відносна магнітна проникність дуже незначно відрізняється від одиниці (за винятком надпровідників). Магнітна сприйнятливості діамагнетиків дуже слабо змінюється з температурою, тому що діамагнітний ефект обумовлений внутрішньоатомними процесами, на які тепловий рух частинок не впливає. Зовнішнім проявом діамагнетизму є виштовхування діамагнетиків з неоднорідного магнітного поля.

До **парамагнетиків** відносять речовини з позитивною магнітною сприйнятливостю, що не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. У парамагнетиках атоми мають елементарний магнітний момент навіть при відсутності зовнішнього поля, однак через тепловий рух ці магнітні моменти розподілені хаотично, тому намагніченість речовини в цілому дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле утворює переважну орієнтацію магнітних моментів атомів в одному напрямку. Теплова енергія протидіє створенню магнітної впорядкованості. Тому парамагнітна сприйнятливості сильно залежить від температури.

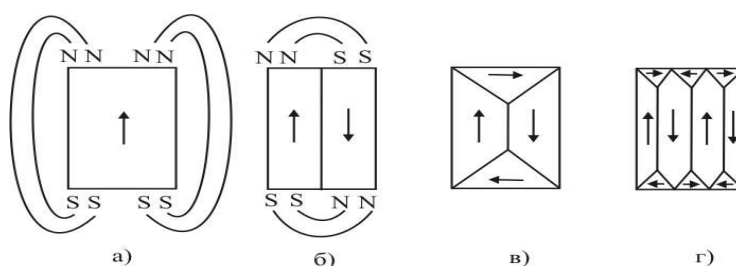
При кімнатній температурі магнітна сприйнятливості парамагнетиків дорівнює  $10^{-3} \dots 10^{-6}$ . Тому їхня магнітна проникність незначно відрізняється

від одиниці. Завдяки позитивній намагніченості парамагнетики, поміщені в неоднорідне магнітне поле, втягуються в нього. У дуже сильних полях і при низьких температурах у парамагнетиках може наступати стан магнітного насичення, при якому всі елементарні магнітні моменти орієнтуються паралельно вектору  $\vec{H}$ .

Парамагнетиками є кисень, окис азоту, лужні й луго-земельні метали, деякі перехідні метали, солі заліза, кобальту, нікелю й рідкоземельних елементів. Парамагнітний ефект за фізичною природою багато в чому аналогічний дипольно-релаксаційній поляризації діелектриків.

**Феромагнетиками** є речовини з великою позитивною магнітною сприйнятливістю (до  $10^6$ ), що сильно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Феромагнетикам властива внутрішня магнітна впорядкованість, що виражається в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів – **магнітних доменів**.

Однодоменний стан енергетично не вигідний, тому що в цьому випадку на кінцях феромагнетика виникають магнітні полюси, що створюють зовнішнє магнітне поле, яке має певну потенційну енергію (рис. 1.1, а). Однодоменну структуру можна розглядати як сукупність декількох магнітів, що стикаються однойменними полюсами.



а – однодоменна; б – дводоменна; в, г – багатодоменні

Рисунок 1.1 - Різні доменні структури феромагнетиків

Кристали малих розмірів можуть складатися з одного домена (утворення границі енергетично не вигідно). Лінійні розміри доменів  $\sim 10^{-1} \dots 10^{-4}$  мм. У межах доменної границі, що розділяє два домена, намагнічені в протилежних напрямках, відбувається плавна зміна орієнтації спинів.

Найважливіша особливість феромагнетиків - їхня здатність намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях.

З елементарних речовин феромагнетиками є залізо, кобальт, нікель, а також шість рідкоземельних елементів: гадоліній, диспрозій, гольмій, ербій, тербій і тулій. Рідкоземельні елементи проявляють феромагнітні властивості

при знижених температурах. Феромагнетиками є багато сплавів на основі магнітних елементів, а також сплави магнітних елементів з немагнітними. Феромагнітні властивості виявлені в деяких сплавах, що складаються цілком з немагнітних елементів – так називані сплави Гейслера (наприклад,  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$ ).

**Антиферомагнетиками** є речовини, у яких нижче деякої температури спонтанно виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових атомів або іонів кристалічної решітки. Для антиферомагнетиків характерна невелика позитивна магнітна сприйнятливність ( $\chi_m = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ ), яка сильно залежить від температури. При нагріванні в антиферомагнетику відбувається фазовий перехід у парамагнітний стан. Температура такого переходу, при якій зникає магнітна впорядкованість, називається точкою Нееля (або антиферомагнітною точкою Кюрі).

Антиферомагнетизм виявлений у хрому, марганцю й ряду рідкоземельних елементів (Ce, Nd, Sm і ін.). Типовими антиферомагнетиками є найпростіші хімічні сполуки на основі металів перехідної групи типу окислів, галогенідів, сульфідів, карбонатів і т.п. Усього відомо біля тисячі сполук із властивостями антиферомагнетиків.

**Феримагнетиками** є речовини, магнітні властивості яких обумовлені некомпенсованим антиферомагнетизмом. Подібно феромагнетикам вони мають високу магнітну сприйнятливність, що істотно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Поряд із цим феримагнетики характеризуються й рядом істотних відмінностей від феромагнітних матеріалів.

Феримагнетики дістали свою назву від феритів, під якими розуміють хімічні сполуки окису заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  з окислами інших металів. Властивості феримагнетиків мають деякі впорядковані металеві сплави, але, головним чином, - різні оксидні сполуки, серед яких найбільший практичний інтерес представляють ферити.

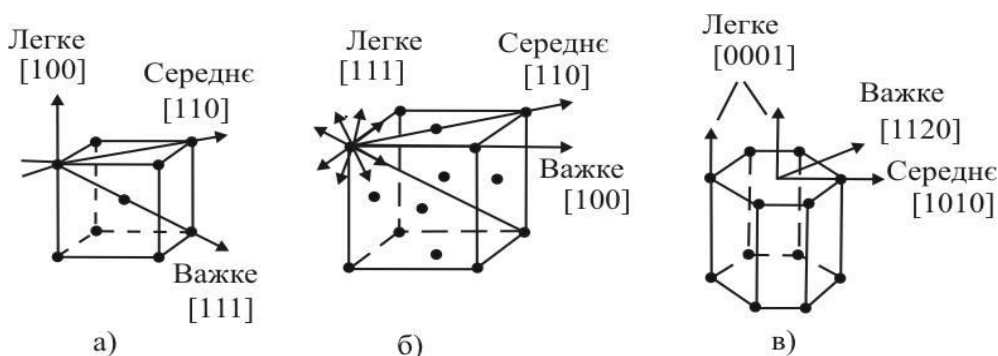
Від парамагнетиків ферити відрізняються нелінійними магнітними властивостями й високою магнітною сприйнятливністю, що є наслідком їхньої доменної будови, а в порівнянні з феромагнетиками ферити мають істотно меншу індукцію насичення.

Діа-, пара- і антиферомагнетики можна об'єднати в групу слабкомагнітних речовин, тоді як феро- і феримагнетики є сильномагнітними матеріалами.



## 1.2 Процеси при намагнічуванні феро- і феримагнетиків

**Магнітна анізотропія.** У монокристалах феро- і феримагнітних речовин існують напрямки легкого й важкого намагнічування. Число таких напрямків визначається симетрією кристалічної решітки. При відсутності зовнішнього поля магнітні моменти доменів спонтанно орієнтуються вздовж однієї з осей легкого намагнічування (рис. 1.2)



а - залізо; б - нікель; в - кобальт

Рисунок 1.2 - Напрямки легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалах феромагнетиків

У монокристалі заліза (рис. 1.2,а), що має структуру об'ємноцентрованого куба, можна виділити шість еквівалентних напрямків легкого намагнічування типу  $[100]$ . Напрямок просторової діагоналі куба  $[111]$  відповідає напрямку важкого намагнічування.

У нікелю, що має структуру гранецентрованого куба, 8 еквівалентних напрямків по діагоналям  $[111]$ , навпаки, є напрямками легкого намагнічування (рис. 1.2,б). Кобальт, що кристалізується в гексагональній структурі (рис. 1.2,в), має лише два напрямки легкого намагнічування, тобто магнітні моменти доменів при відсутності зовнішнього поля можуть бути орієнтовані лише у двох антипаралельних напрямках.

**Крива намагнічування.** Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають кривою намагнічування (рис. 1.3).

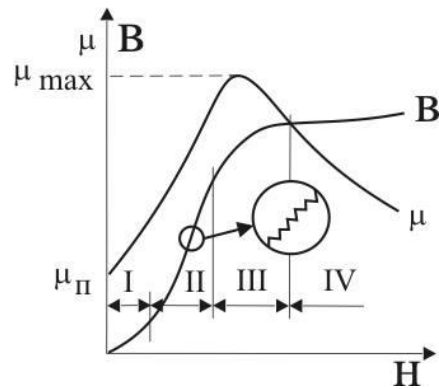


Рисунок 1.3 - Залежність магнітної індукції  $B$  и магнітної проникності  $\mu$  ферромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$

За вихідний приймають розмагнічений стан зразка, коли за відсутності зовнішнього поля індукція  $B = 0$  внаслідок рівноймовірно розподілу магнітних моментів доменів по всіх можливих напрямках легкого намагнічування. Розмагнічування ферромагнетика здійснюють шляхом впливу на нього змінним магнітним полем, амплітуду напруженості якого поступово зменшують до нуля.

Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів. На ділянці I відбувається оборотний (пружний) зсув доменних границь. Об'єм тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком зовнішнього поля, збільшується і, навпаки, зменшуються розміри доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. В разі зняття слабкого поля доменні границі повертаються в колишнє положення; залишкова намагніченість у зразку не виникає. При більш сильних полях (область II) зсув доменних границь має необоротний, стрибкоподібний, характер, а крива намагнічування має найбільшу крутизну. У міру подальшого збільшення напруженості магнітного поля зростає роль механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямком легкого намагнічування, що утворює невеликий кут з полем, поступово повертаються в напрямку поля, тобто в напрямку більш важкого намагнічування (область III). Коли всі магнітні моменти доменів вже орієнтовані вздовж поля, відбувається технічне насичення намагніченості (область IV). Незначне зростання індукції на ділянці насичення обумовлено складовою рівняння (5.2)  $\mu_0 \bar{H}$ , а також «істинним намагнічуванням», тобто збільшенням намагніченості самого домена. На відміну від істинного намагнічування, зростання індукції за рахунок процесів зсуву доменних границь і обертання магнітних моментів часто називають технічним

намагнічуванням феромагнетика. Основні стадії технічного намагнічування схематично показані на рис. 1.4.

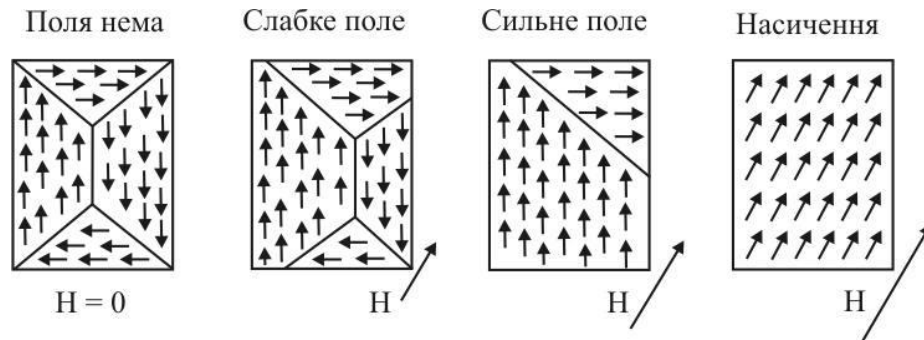


Рисунок 1.4 - Схема орієнтації спинів у доменах феромагнетика

**Магнітний гістерезис.** Якщо феромагнетик намагнітити до насичення  $B_s$ , а потім відключити зовнішнє поле, то індукція в нуль не повернеться, а буде мати деяке значення  $B_r$ , називане залишковою індукцією (рис. 1.5).

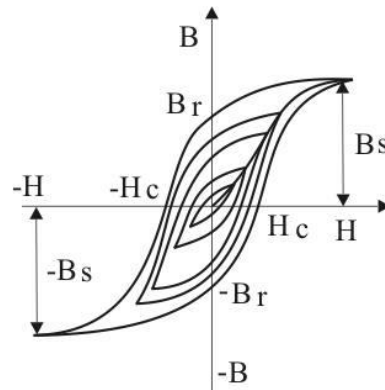


Рисунок 1.5 - Петлі гістерезису при різних значеннях амплітуди змінного магнітного поля й основна крива намагнічування феромагнетика

Щоб позбутися залишкової індукції, необхідно прикласти магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість розмагнічуючого поля  $-H_c$ , при якій індукція у феромагнетика, попередньо намагніченому до насичення, повертається в нуль, називають **коерцитивною силою**.

Збільшення напруженості поля до значень, більших  $-H_c$ , викликає перемагнічування феромагнетика аж до насичення ( $-B_s$ ). Таким чином, зміна магнітного стану феромагнетика при його циклічному перемагнічуванні характеризується явищем **гістерезису**, тобто відставання індукції від напруженості поля. Магнітний гістерезис обумовлений необоротними процесами намагнічування. Для різних амплітудних значень напруженості зовнішнього поля можна одержати сімейство петель гістерезису. Петлю гістерезису, отриману при індукції насичення, називають граничною. При подальшому зростанні поля площа гістерезисної петлі залишається незмінною.

Залишкова індукція  $B_r$  і коерцитивна сила  $H_c$  є параметрами граничної петлі гістерезису. Сукупність вершин петель гістерезису утворює **основну криву намагнічування** феромагнетика. Основна крива намагнічування для магнетом'яких матеріалів (з малою  $H_c$ ) практично не відрізняється від початкової кривої.

**Магнітна проникність.** Магнітну проникність, визначену за формулою  $\mu = B/(\mu_0 H)$ , називають **статичною магнітною проникністю**. Вона пропорційна тангенсу кута нахилу січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування. Залежність  $\mu(H)$  було показано на рис. 1.3. Граничне значення магнітної проникності  $\mu_n$  при напруженості магнітного поля, близькій до нуля, називають **початковою магнітною проникністю**. Ця характеристика має найважливіше значення при технічному використанні багатьох магнітних матеріалів. Експериментально її визначають у слабких полях з напруженістю порядку 0,1 А/м.

Крутість окремих ділянок кривої намагнічування характеризують **диференційною магнітною проникністю**:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

У тому самому зразку максимальне значення диференціальної проникності  $(\mu_{\text{диф}})_{\text{max}}$  завжди перевищує максимальне значення статичної проникності  $\mu_{\text{max}}$ .

**Магнітострикція.** Зміна магнітного стану феромагнітного зразка супроводжується зміною його лінійних розмірів і форми; це явище називають магнітострикцією. Розрізняють лінійну й спонтанну магнітострикцію.

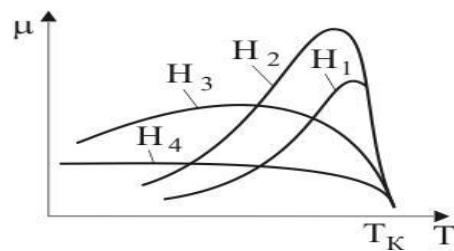
**Спонтанна магнітострикція** виникає при переході речовини з парамагнітного у феромагнітний стан в процесі охолодження до температури нижче точки Кюрі.

**Лінійна (індукована) магнітострикція** пов'язана з деформаціями кристалічної решітки під дією зовнішнього поля. Лінійну магнітострикцію оцінюють значенням відносної деформації зразка в напрямку магнітного поля:  $\lambda = \Delta l/l$ . Чисельне значення **коефіцієнта магнітострикції**  $\lambda$  залежить від типу структури, кристалографічного напрямку, напруженості магнітного поля й температури. Лінійна магнітострикція може бути як позитивною, так і негативною, тобто розміри зразка в напрямку поля при намагнічуванні можуть як збільшуватися, так і зменшуватися.

Відносну магнітострикційну деформацію, що виникає при магнітному насиченні зразка, називають **константою магнітострикції**  $\lambda_s$ .

Зміна розмірів феромагнетика при намагнічуванні супроводжується появою в ньому внутрішніх напружень і деформацій, які перешкоджають зсуву доменних границь. Тому магнітострикція, як і кристалографічна анізотропія, утрудняє процес намагнічування феромагнетика в слабких полях і зменшує магнітну проникність матеріала. Різний знак коефіцієнта магнітострикції заліза й нікелю у слабких полях використовується для виготовлення залізонікелевих сплавів типу пермалой з великою початковою магнітною проникністю. У пермалоях зі вмістом нікелю  $\approx 80\%$  коефіцієнти магнітострикції у всіх основних кристалографічних напрямках  $\approx 0$ .

Константа магнітострикції зменшується при нагріванні феромагнетика й досягає нуля при температурі переходу речовини в парамагнітний стан (точка Кюрі). При нагріванні поступово відбувається теплова дезорієнтація спинових магнітних моментів і зменшення спонтанної намагніченості (рис. 1.6).



$H_4 > H_3 > H_2 > H_1$ ;  $H_1$  - відповідає  $\mu_n$ ,  $H_4$  - відповідає області технічного насичення

Рисунок 1.6 - Температурна залежність магнітної проникності феромагнетика при різних напруженостях зовнішнього магнітного поля

Вище деякої температури доменна структура розпадається, тобто спонтанна намагніченість зникає й феромагнетик переходить у парамагнітний стан. Температуру такого фазового переходу називають **магнітною точкою Кюрі**. Із усіх феромагнетиків найбільш високу точку Кюрі ( $T_K = 1131^\circ\text{C}$ ) має кобальт. Для чистого нікелю вона відповідає температурі  $358^\circ\text{C}$ . Поблизу точки Кюрі намагніченість насичення різко падає, магнітна проникність феромагнетика стає приблизно рівній одиниці, а також змінюються питомий опір, теплоємність, температурний коефіцієнт лінійного розширення й ін.

У більшості феритів, як і у феромагнетиків, намагніченість насичення  $J_M$  монотонно зменшується при нагріванні й дорівнює нулю при температурі переходу в парамагнітний стан, коли повністю зникає магнітна впорядкованість. Температуру такого переходу називають **точкою Нееля**, або антиферомагнітною точкою Кюрі.

Поряд із цим у деяких феритів намагніченість  $J_{MS}$  може досягати нуля при температурі нижче точки Кюрі - появляється точка компенсації  $T_{ком}$ , при якій ферит перетворюється в антиферомагнетик.

### 1.3 Поводження феромагнетиків у змінних магнітних полях

**Магнітні втрати.** Перемагнічування феромагнетиків у змінних полях супроводжується втратами енергії, що призводить до нагрівання матеріалу. У загальному випадку втрати на перемагнічування складаються із втрат на гістерезис, на вихрові струми й магнітну післядію. Звичайно внеском механізму магнітної післядії в розігрів феромагнетика можна знехтувати.

**Втрати на гістерезис** за один цикл перемагнічування (тобто за один період зміни поля), віднесені до одиниці об'єму речовини, визначаються площею статичної петлі гістерезису, тобто петлі, отриманої при повільній зміні магнітного потоку.

Втрати на гістерезис обумовлені необоротними процесами перемагнічування. Енергію цих втрат  $E_g$  (Дж/м<sup>3</sup>) можна обчислити за емпіричною формулою  $E_g = \eta B_m^n$ , де  $\eta$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу;  $B_m$  – максимальна індукція, Тл, що досягається в даному циклі;  $n$  – показник ступеня, що приймає значення від 1,6 до 2 залежно від  $B_m$ .

**Вихрові струми** виникають у провідному середовищі за рахунок е.р.с. самоіндукції, пропорційній швидкості зміни магнітного потоку. Статичні петлі гістерезису характеризують лише втрати на гістерезис, а динамічні - є сумарними втратами на гістерезис і вихрові струми, тобто при намагнічуванні змінним полем петля гістерезису розширюється. При цьому втрати на гістерезис  $E_g$  за один період зміни зовнішнього поля залишаються постійними в досить широкому діапазоні частот, а втрати на вихрові струми  $E_{стр}$  зростають пропорційно частоті.

Для практичних цілей більш важливою характеристикою є активна потужність, що виділяється у феромагнетику при його перемагнічуванні, тобто енергія, що витрачається в одиницю часу. Потужність, що обумовлена втратами на вихрові струми:

$$P_{стр} = E_{стр} fV = \xi f^2 B_m^2 V, \quad (1.4)$$

де  $V$  – об’єм зразка,  $\text{м}^3$ ;  $\xi$  - коефіцієнт, пропорційний питомій провідності речовини й залежний від геометричної форми й розмірів поперечного перерізу зразка, що намагнічується.

Потужність, що обумовлена втратами на гістерезис:

$$P_z = \eta B_m^n f V . \quad (1.5)$$

Оскільки величина  $P_{\text{стр}}$  залежить від другого ступеня частоти, а величина  $P_{\text{Г}}$  - від першого ступеня, при високих частотах враховують у першу чергу величину  $P_{\text{стр}}$ , тобто втрати на вихрові струми. Вихрові струми завжди виникають у площині, розташованій перпендикулярно магнітному полю.

Для зменшення втрат на вихрові струми необхідно використовувати магнітний матеріал з підвищеним питомим опором, або збирати сердечник з тонких аркушів, ізольованих один від одного. Потужність, що витрачається на вихрові струми в одиниці маси й виражена у Вт/кг, пов’язана з товщиною

аркуша  $h$  співвідношенням  $P_{\text{стр}} = \frac{P_{\text{стр}}}{V\gamma}$ , де  $\gamma$  - густина матеріалу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

**Втрати на магнітну післядію** обумовлені відставанням магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля на час від часток мілісекунди до декількох хвилин. Однією з основних причин магнітної післядії є теплова енергія, що допомагає слабо закріпленим доменним границям переборювати енергетичні перешкоди (бар’єри), що заважають їхньому вільному зсуву при зміні поля. Фізична природа втрат на магнітну післядію багато в чому аналогічна релаксаційній поляризації діелектриків.

**Кут магнітних втрат.** У слабких полях і на високих частотах динамічна петля гістерезису внаслідок відставання індукції від напруженості поля має форму еліпса через  $\delta_{\mu}$ . Кут відставання  $\delta_{\mu}$  називають кутом магнітних втрат (рис. 5.7).

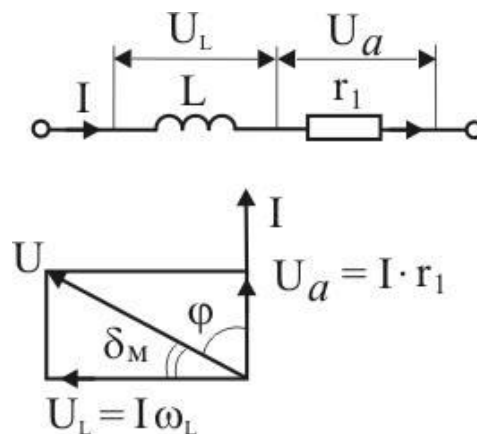


Рисунок 1.7 - Еквівалентна схема й векторна діаграма індуктивної котушки з магнітним сердечником

З векторної діаграми видно, що  $\operatorname{tg} \delta_m = \frac{r_1}{\omega L}$ . Звідси активна потужність:

$$P_a = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta_m.$$

Величину, зворотну  $\operatorname{tg} \delta_m$ , називають **добротністю сердечника**.

**Поверхневий ефект.** Відповідно до закону Ленца власне магнітне поле вихрових струмів прагне послабити зміну основного магнітного потоку, тобто вихрові струми розмагнічують сердечник. Змінний магнітний потік нерівномірно розподіляється по перетині магнітопровода; магнітна індукція має найменше значення в центральних частинах перетину, тобто вихрові струми екранують центральний об'єм сердечника від проникнення в нього магнітного струму. **Витиснення магнітного поля на поверхню** проявляється тим сильніше, чим більше частота, магнітна проникність і питома провідність намагнічуваного середовища.

Коли поверхневий ефект є сильно вираженим, зміна магнітної індукції по перетині сердечника вздовж нормалі  $z$  до його поверхні характеризується рівнянням

$$B \approx B_{m0} \exp\left(-\frac{z}{\Delta}\right),$$

де  $B_{m0}$  – магнітна індукція на поверхні сердечника, Тл;  $\Delta$  – глибина проникнення електромагнітного поля в речовину, м.

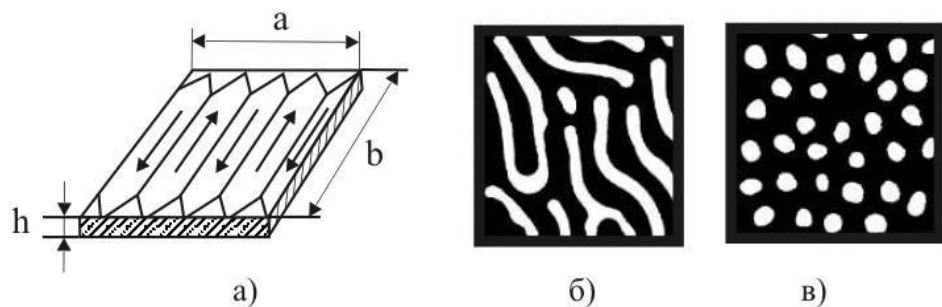
Загасання електромагнітної хвилі при її поширенні в провідному середовищі використовується при створенні електромагнітних екранів, які служать для захисту електронних схем і електровимірювальних приладів від зовнішніх наведень, а також для захисту радіоефіра від перешкод, створюваних генераторними пристроями. Для ефективного захисту товщина стінок екрана повинна перевищувати, принаймні, глибину проникнення  $\Delta$  електромагнітного поля в речовину. На радіочастотах практично непроникними є екрани з добре провідних металів (міді, латуні й алюмінію). Однак на низьких частотах такі екрани неефективні, оскільки необхідні дуже товсті стінки (у міді на частоті 50 Гц - 1 см). У цих випадках краще використовувати екрани з феромагнітних матеріалів, особливо з пермалоя, що має досить високу магнітну проникність.



## 1.4 Доменні структури в тонких магнітних плівках

При малій товщині плівки напрямок легкого намагнічування виявляється розташованим у площині плівки. Утворюються плоскі домени (рис. 5.8,а).

Дуже тонкі плівки мають однодоменну структуру, а плівки товщиною  $\sim 10^{-3} \dots 10^{-2}$  мм - багатодоменну з довгих вузьких доменів (шириною від часток мікрметра до декількох мікрметрів), намагнічених у протилежних напрямках.



а – довгі вузькі домени; б- лабіринтова структура доменів;  
в - циліндричні магнітні домени

Рисунок 1.8 - Доменні структури в тонких магнітних плівках

Під впливом зовнішнього поля вся система смуг може переміщатися й повертатися, і її використовують як керовану дифракційну решітку для світла й найближчого діапазону хвиль електромагнітного спектра.

Особливими є монокристалічні плівки деяких феритів, що мають лише одну вісь легкого намагнічування. Якщо площина плівки є перпендикулярною осі легкого намагнічування, то при відсутності зовнішнього поля плівка має лабіринтову доменну структуру. Тобто внаслідок одноосьової анізотропії утворюються домени із протилежним напрямком спонтанної намагніченості (світлі й темні місця на рис. 1.8,б). Зовнішнє поле, перпендикулярне площині плівки, змінює геометрію доменної структури. У міру збільшення напруженості поля спочатку відбувається розрив лабіринтової структури, а потім утворюються стійкі **циліндричні магнітні домени** (ЦМД), або «магнітні пухирці» (рис. 1.8,в). При подальшому збільшенні напруженості поля діаметр ЦМД поступово зменшується й при деякому значенні  $H$  вся плівка намагнічується однорідно - циліндричні домени зникають.

Стійкі циліндричні магнітні домени можливі в ортоферитах, що мають орторомбічну структуру і хімічний склад  $MeFe_3$ , де  $Me$  – тривалентний іон ітрія або рідкоземельного елемента, а також у феритах зі структурою граната, гексаферитах і деяких металевих магнітних плівках.

При виготовленні плівок у ферогранатах може наводитися одноосьова магнітна анізотропія за рахунок пружних напружень, пов'язаних, наприклад, з невідповідністю періодів решіток підкладки й плівки. Лінійні розміри ЦМД в ортоферитах становлять десятки або навіть сотню мікрометрів, а в плівках ферогранатів - одиниці мікрометрів.

Циліндричні магнітні домени, керовані зовнішнім полем і існуючі в певному інтервалі  $H$ , можна використати для створення запам'ятовувальних і логічних пристроїв. Значенню «1» відповідає наявність домена в певній точці інформаційного середовища, а значенню «0» – його відсутність. Якщо в площині плівки створити неоднорідне магнітне поле, то можна спостерігати переміщення ЦМД під дією цього поля. Високою рухливістю доменних границь характеризуються ортоферити [ $\mu_r = v_r/H = 10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ м}^2/(\text{А} \cdot \text{с})$ ].

Генерувати домени, управляти їхнім переміщенням, фіксувати їхню наявність або відсутність у заданій точці (тобто зчитувати інформацію) можна шляхом керування дискретним переміщенням ЦМД у заданому напрямку. Змінюючи напрямок керуючого поля, що діє в площині плівки, можна змінювати полярність магнітних зарядів на елементах аплікації. Зчитування інформації може бути здійснено, наприклад, за допомогою датчиків Хола або магніторезисторів. У холловському датчику індукується е.р.с. під дією магнітного поля домена, а в магніторезисторах використовується ефект зміни електричного опору матеріалу в магнітному полі.

Пристрої на ЦМД характеризуються великою інформаційною ємністю й малою споживаною потужністю.

## 1.5 Класифікація магнітних матеріалів

Застосовувані в електронній техніці магнітні матеріали підрозділяють на дві основні групи: магнітом'які й магнітотверді; в окрему групу виділяють матеріали спеціалізованого призначення (рис.1.9).

До **магнітом'яких** відносять магнітні матеріали з малою коерцитивною силою й високою магнітною проникністю. Вони мають здатність намагнічуватися до насичення в слабких магнітних полях, характеризуються вузькою петлею гістерезису й малими втратами на перемагнічування. Магнітом'які матеріали використовуються в основному в якості різних магнітопроводів: сердечників дроселів, трансформаторів, електромагнітів, магнітних систем електровимірювальних приладів і т. п.

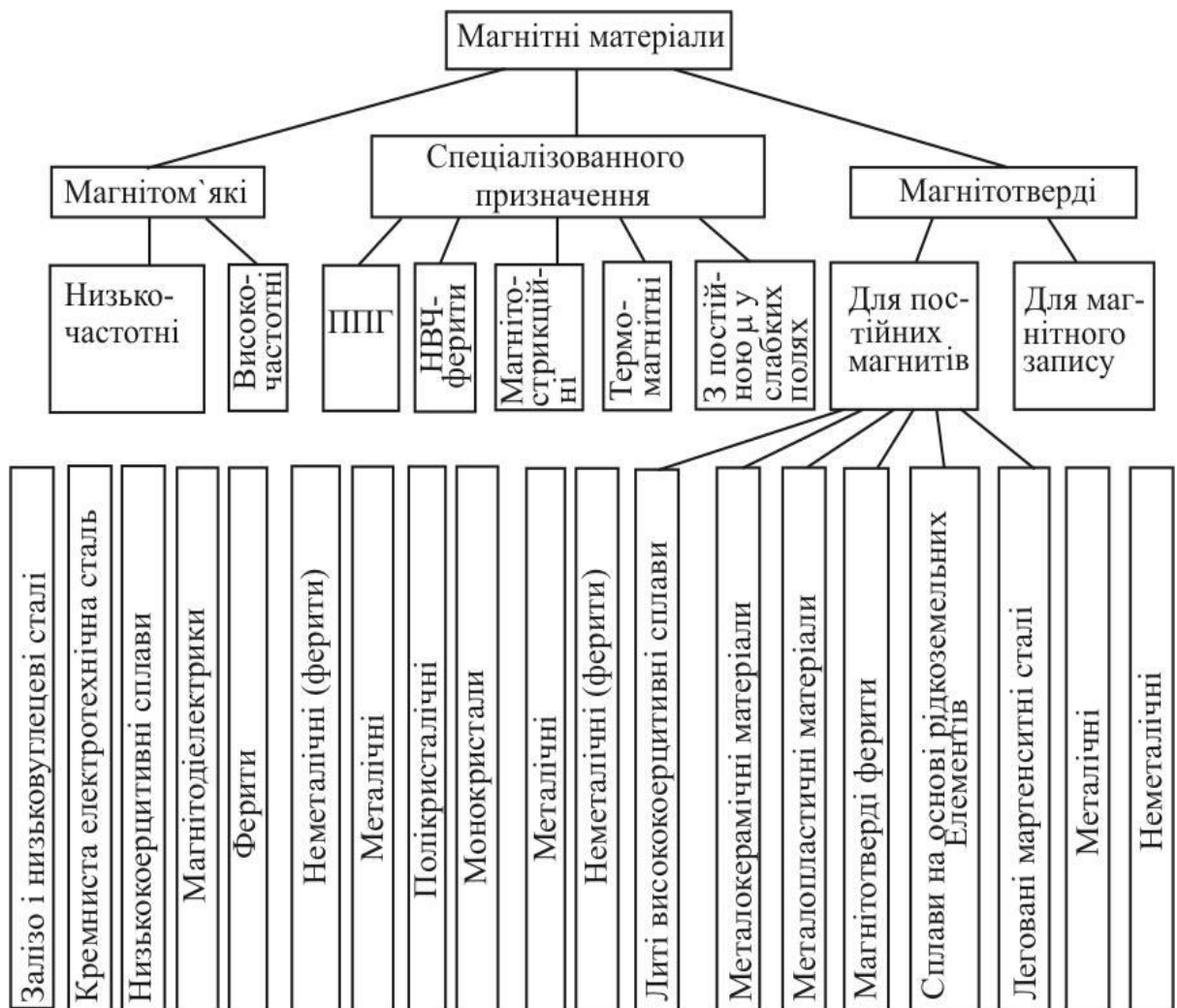


Рисунок 1.9 - Класифікація магнітних матеріалів

До **магнітотвердих** відносять матеріали з великою коерцитивною силою  $H_c$ . Вони перемагнічуються лише в дуже сильних магнітних полях і служать в основному для виготовлення постійних магнітів.

Умовно магнітом'якими вважають матеріали, у яких  $H_c < 800$  А/м, а магнітотвердими – із  $H_c > 4$  кА/м. В кращих магнітом'яких матеріалах коерцитивна сила може досягати 1 А/м, а в кращих магнітотвердих матеріалах її значення перевищує 500 кА/м.

Матеріали спеціалізованого призначення - це матеріали із прямокутною петлею гістерезису (ППГ), ферити для пристроїв надвисокочастотного діапазону й магніострикційні матеріали. Усередині кожної групи розподіл магнітних матеріалів за родами і видами відбиває розходження в їхній будові й хімічному складі, технології й деякі специфічні властивості.

## 1.6 Магнітом'які матеріали для постійних і низькочастотних магнітних полів

**Основні вимоги.** Крім високої магнітної проникності й малої коерцитивної сили магнітом'які матеріали повинні мати велику індукцію насичення, що дозволяє зменшити габаритні розміри й масу магнітної системи.

Магнітний матеріал, використовуваний у змінних полях, повинен мати можливо менші втрати на перемагнічування, які складаються в основному із втрат на гістерезис і вихрові струми. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах обирають магнітом'які матеріали з підвищеним питомим опором. Часто магнітопроводи збирають із окремих ізольованих тонких листів. Стрічкові сердечники навивають із тонкої стрічки з міжвитковою ізоляцією з діелектричного лаку. Важливою вимогою до магнітом'яких матеріалів є забезпечення стабільності їхніх властивостей, як у часі, так і стосовно зовнішніх впливів, таких, як температура й механічні напруги.

**Залізо й низьковуглецеві сталі.** Основним компонентом більшості магнітних матеріалів є залізо (табл. 1.1).

Саме залізо в елементарному вигляді є типовим магнітом'яким матеріалом. Серед елементарних феромагнетиків залізо має найбільшу індукцію насичення (близько 2,2 Тл). Властивості заліза залежать від вмісту домішок, структури матеріалу, розміру зерен, наявності механічних напруг.

**Технічно чисте залізо** звичайно містить невелику кількість домішок вуглецю, марганцю, кремнію й інших елементів, що погіршують його магнітні властивості. Через порівняно низький питомий опір його використовують, в основному, для виготовлення магнітопроводів постійного магнітного потоку. Звичайне технічно чисте залізо має сумарний вміст домішок 0,08...0,1 %.

**Кремниста електротехнічна сталь** (тонколистова) є основним магнітом'яким матеріалом масового споживання. Домішка кремнію підвищує питомий опір, що знижує втрати на вихрові струми, збільшує  $\mu_{п}$  і  $\mu_{max}$ , зменшує коерцитивну силу і втрати на гістерезис.

Таблиця 1.1 – Властивості магнітом'яких матеріалів

Матеріал	Магнітна проникність		Коерцитивна сила, А/м	Індукція насичення, Тл	Питомий опір, мкОм·м
	початкова	максимальна			
Технічно чисте залізо	250...400	3500...4500	50...100	2,18	0,1
Електроліти	600	15 000	30	2,18	0,1

чне залізо					
Карбонільне залізо	2000...3000	20 000... 21 500	6,4	2,18	0,1
Монокристал найчистішого заліза	>20 000	1 430 000	0,8	-	0,097
Електротехнічна сталь	200...600	3000...8000	10...65	1,95...2,02	0,25... 0,6
Низьконікелевий пермалой	1500...4000	15 000... 60 000	5...32	1,0...1,6	0,45... 0,9
Високонікелеві пермалої	7 000... 100 000	50 000... 300 000	0,65...5	0,65... 1,05	0,16... 0,85
Суперпермалой 79% Ni, 5% Mo, 15% Fe, 0,5% Mn	100 000	До 1 500 000	0,3	0,8	0,6

Використання листових і стрічкових сердечників з електротехнічної сталі на частотах вище 1 кГц можливе лише при істотному обмеженні магнітної індукції, так, щоб сумарні втрати не перевищували допустимої межі. За умовами нагрівання й тепловідводу гранично допустимими прийнято вважати питомі втрати 20 Вт/кг.

#### **Низькокоерцитивні сплави**

**Пермалої** – залізонікелеві сплави, що мають досить велику магнітну проникність в області слабких полів і дуже маленьку коерцитивну силу. Високонікелеві пермалої містять 72...80 % нікелю, а низьконікелеві - 40...50 %

Найбільша початкова й максимальна магнітна проникність є у суперпермалою (див. табл. 1.1), що містить 78,5 % Ni. Дуже легке намагнічування цього сплаву в слабких полях є наслідком практичної відсутності в нього магнітної анізотропії і явища магнітострикції. Магнітні властивості пермалоїв дуже чутливі до зовнішніх механічних напруг, залежать від хімічного складу й наявності сторонніх домішок у сплаві, а також дуже

різко змінюються залежно від режимів термообробки матеріалу (температури, швидкості нагрівання й охолодження, навколишнього середовища й т.д.).

Індукція насичення високонікелевих пермалоїв майже у два рази нижче, ніж у електротехнічної сталі, і в півтора рази нижче, ніж у низьконікелевих пермалоїв. Магнітні проникності високонікелевих пермалоїв у кілька разів вище, ніж у низьконікелевих, і набагато перевершують проникності електротехнічних сталей, питомий опір - майже в три рази менше. Тому при підвищених частотах доцільніше використовувати низьконікелеві пермалої. Магнітна проникність пермалоїв сильно знижується зі збільшенням частоти внаслідок виникнення у матеріалі помітних вихрових струмів через невеликий питомий опір.

Вартість пермалоїв визначається вмістом у їхньому складі нікелю. У марках пермалоїв буква Н означає нікель, К - кобальт, М - марганець, Х - хром, С - кремній (сіліцій), Д - мідь; додаткова буква У - сплав з поліпшеними властивостями, П - із прямокутною петлею гістерезису. Цифра в марці вказує процентний вміст нікелю.

Низьконікелеві сплави 45Н и 50Н застосовують для виготовлення сердечників малогабаритних силових трансформаторів, дроселів, реле й деталей магнітних ланцюгів, що працюють при підвищених індукціях без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням. Зі сплаву 50НХС виготовляють сердечники імпульсних трансформаторів і апаратури зв'язку звукових і високих частот у режимі без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням.

Високонікелеві сплави 79НМ, 80НХС, 76НХД використовують для виготовлення сердечників малогабаритних трансформаторів, реле й магнітних екранів, а при товщині 0,02 мм - сердечників імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів і безконтактних реле.

**Альсіфери** – потрібні сплави заліза із кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсіфера: 9,5 % Si, 5,6 % Al, інше - Fe. Такий сплав відрізняється твердістю й крихкістю, але може бути виготовлений у вигляді фасонних виливків. Властивості альсіфера:  $\mu_{\text{н}} = 35400$ ;  $\mu_{\text{max}} = 117000$ ;  $H_c = 1,8 \text{ А/м}$ ;  $\rho = 0,8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ . Вироби з альсіфера (магнітні екрани, корпуси приладів і т.п.) виготовляють методом лиття з товщиною стінок не менш як 2...3 мм через крихкість сплаву. Завдяки крихкості альсіфера, його можна розмелювати в порошок і використовувати поряд з карбонільним залізом для виготовлення високочастотних пресованих сердечників.

## 1.7 Магнітом'які високочастотні матеріали

Під високочастотними магнітом'якими матеріалами розуміють речовини, які повинні виконувати функції магнетиків при частотах  $\geq 10^2 \dots 10^3$  Гц.

За фізичною природою високочастотні магнітом'які матеріали поділяють на **магнітодіелектрики** й **ферити**. При звукових, ультразвукових і низьких радіочастотах можна використовувати також тонколистові рулонні холоднокатані електротехнічні сталі й пермалої. Товщина сталей досягає 30...25 мкм, а пермалої - товщиною до 3...2 мкм.

**Ферити** - це оксидні магнітні матеріали, у яких спонтанна намагніченість доменів обумовлена некомпенсованим антиферомагнетизмом.

Великий питомий опір  $\rho$ , що перевищує  $\rho$  заліза в  $10^3 \dots 10^{13}$  разів, а отже, і відносно незначні втрати енергії в області підвищених і високих частот поряд з досить високими магнітними властивостями забезпечують феритам широке застосування в радіоелектроніці.

Ферити виготовляють у вигляді кераміки й монокристалів. Завдяки невисокій вартості й відносній простоті технологічного циклу керамічні матеріали займають провідне місце серед високочастотних магнетиків. Найбільш широко застосовують **нікель-цинкові** й **марганець-цинкові** ферити. Вони кристалізуються в структурі шпінелі і є твердими розчинами заміщення, утвореними двома простими феритами, один із яких ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  або  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ) є феримагнетиком, а інший ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ) – немагнітний. Збільшення концентрації немагнітного компонента призводить до збільшення намагніченості насичення (а отже, і  $B_s$ ) твердого розчину і монотонного зниження температури Кюрі ( $T_K$ ).

Марганець-цинкові ферити із грубозернистою структурою (із середнім розміром кристалітів  $\sim 40$  мкм) можуть мати початкову магнітну проникність  $\mu_{п} \sim 20000$ , майже як у кращих марок пермалою.

В маркуванні магнітом'яких феритів (табл. 1.2) на першому місці позначено чисельне значення  $\mu_{п}$ , потім ідуть букви, що визначають частотний діапазон застосування, що обмежується зверху значенням критичної частоти  $f_{кр}$ . Ферити для звукових, ультразвукових і низьких радіочастот позначають буквою Н (низькочастотні), критична частота для них частота - 0,1...50 МГц. Високочастотні ферити маркуються ВЧ, критична частота - 50...600 МГц. Далі в маркуванні стоять букви, що означають склад матеріалу: М – марганець-цинковий ферит, Н – нікель-цинковий і т.д. Ферити марок ВЧ за складом є нікель-цинковими.

Таблиця 1.2 – Властивості феритів

Марка	$\mu_{п}$	$\frac{tg\delta}{\mu_{п}} \cdot 10^6, \text{ при } f, \text{ МГц}$	$\mu_{\max}$	$H_c, \text{ А/м}$	$B_r, \text{ Тл}$	$f_{кр}, \text{ МГц}$	$f_{гр}, \text{ МГц}$	$T_k, ^\circ\text{C}$ (не нижче )	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$d, \text{ Мг/м}^3$	Примітка
20000НМ	15000	25	3500	0,24	0,11	0,01	0,1	110	0,00	5,0	Загальна
6000 НМ	4800-	(0,01)	0	8	0,11	0,02	0,5	130	1	4,7	
1000 НМ	8000	40	1000	28	0,11	1,0	5	200	0,1	4,5	
	800-1200	(0,02)	0						0,5		
1000 НН	800...1	85 (0,1)	3000	24	0,10	0,4	3	110	10	4,9	
600 НН	200	25 (0,1)	1500	40	0,12	1,2	5	110	100	4,8	
	500...800										
2000 НМ1	1700...500	15 (0,1)	3500	25	0,12	0,5	1,5	200	5	5	Термоста- більні, для
700 НМ1	550...850	8 (0,1)	1800	25	0,05	5	8	200	4	4,8	
100 ВЧ	80...120	135	280	300	0,15	35	80	400	$10^5$	4,8	апаратур и з підвище- ними вимо- гами(фер и-ти марок ВЧ -нікель- цинкові)
20 ВЧ2	0	(18)	45	1000	0,1	120	300	450	$10^6$	4,7	
	16...24	280									
		(30)									
300 НН	280...350	170 (4)	600	80	0,13	5	20	20	$10^6$	4,8	Для кон- турів, що перебудо- вуються підмагні- чуванням
9 ВЧ	9...13	850(15)	30	1500	0,06	250	600	500	$10^7$	4,4	
200 ВЧ	180...2	90 (10)	360	70	0,11	20	-	360	$10^3$	4,7	Для широко-



50 ВЧЗ	20 45...65	120 (30)	200	100	0,14	85	-	480	$10^4$	4,6	смугових транс- форматор ів
--------	---------------	-------------	-----	-----	------	----	---	-----	--------	-----	--------------------------------------

У змінних полях, крім початкової магнітної проникності однією з найважливіших характеристик феритів є тангенс кута втрат  $\operatorname{tg}\delta$ . Завдяки низькій провідності складова втрат на вихрові струми у феритах й нею можна знехтувати. У слабких магнітних полях незначними виявляються й втрати на гістерезис. Тому значення  $\operatorname{tg}\delta$  у феритах на високих частотах в основному визначається магнітними втратами, обумовленими релаксаційними й резонансними явищами. Для оцінки допустимого частотного діапазону, у якому може використовуватися даний матеріал, вводять поняття критичної частоти  $f_{\text{кр}}$  - частоту, при якій  $\operatorname{tg}\delta$  досягає значення 0,1. Частоту  $f_{\text{гр}}$ , при якій початкова магнітна проникність зменшується до 0,7 від її значення в постійному магнітному полі, називають **граничною**. Як правило,  $f_{\text{кр}} < f_{\text{гр}}$ . В області частот до 1 МГц марганець-цинкові ферити мають істотно менший відносний тангенс кута втрат, ніж нікель-цинкові ферити, а також підвищену індукцію насичення й більш високу температуру Кюрі. У той же час нікель-цинкові ферити мають більш високий питомий опір і кращі частотні властивості.

Магнітна проникність феритів  $\mu_n$  підвищується з ростом температури до точки Кюрі й потім різко падає. Щоб не було погіршення магнітних характеристик, ферити слід оберігати від механічних навантажень.

За електричними властивостями ферити належать до класу напівпровідників. Їхня електропровідність обумовлена процесами електронного обміну між іонами змінної валентності («стрибковий» механізм). Електрони, що беруть участь в обміні, можна розглядати як носії заряду, концентрація яких практично не залежить від температури. Але при підвищенні температури зростає рухливість носіїв заряду. Найменший серед феритів питомий опір має магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (ферит заліза), у якого  $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$  Ом·м. У ферогранатів питомий опір може досягати високих значень (до  $10^9$  Ом·м). Ферити з високою магнітною проникністю, як правило, мають невисокий питомий опір.

Для феритів характерна відносно велика діелектрична проникність  $\epsilon$ , що зменшується з підвищенням частоти. Так, нікель-цинковий ферит з початковою проникністю  $\mu_n = 200$  на частоті 1 кГц має  $\epsilon = 400$ , а на частоті 10 МГц  $\epsilon = 15$ . Найбільш високе значення  $\epsilon$  властиве марганець-цинковим

феритам, у яких вона досягає сотень або тисяч. Магнітом'які ферити з початковою магнітною проникністю 400...20000 у слабких полях у багатьох випадках ефективно замінюють листові феромагнітні матеріали - пермалой і електротехнічну сталь.

Магнітом'які ферити широко застосовуються як сердечники контурних котушок постійної й змінної індуктивностей, фільтрів в апаратурі радіо- і дротового зв'язку, сердечників імпульсних і ширококутових трансформаторів, трансформаторів розгортання телевізорів, магнітних модуляторів і підсилювачів. З них виготовляють також стрижневі магнітні антени, індуктивні лінії затримки та інші деталі й вузли електронної апаратури.

**Монокристали магнітом'яких феритів** досить широко застосовуються при виготовленні магнітних голівок запису й відтворенні сигналів звукового й відеодіапазонів у магнітофонах. У порівнянні з металевими феритові голівки мають високий питомий опір (що важливо для зменшення втрат) і велику твердість. Через високу швидкість руху магнітної стрічки при відеозапису до матеріалу голівки ставляться підвищені вимоги відносно зносостійкості.

#### **Магнітодіелектрики**

Магнітодіелектрики виготовляють пресуванням порошко-подібного феромагнетика з ізолюючою органічною або неорганічною зв'язкою. Як основу застосовують карбонільне залізо, альсіфер і молібденовий пермалой. Ізолюючою зв'язкою служать фенол-формальдегідні смоли, полістирол, скло й ін. Магнітодіелектрик повинен мати малі втрати та достатню стабільність магнітної проникності в часі й при коливаннях температури. Магнітодіелектрики характеризуються відносно невисокою магнітною проникністю ( $\mu_n = 10...250$ ), яка істотно менше за магнітну проникність монолітних феромагнетиків.

**Пресовані сердечники** застосовують в індуктивних котушках фільтрів, генераторів, частотомірів, контурів радіоприймачів і т.д. Введення такого сердечника в котушку збільшує її індуктивність у більшій мірі, ніж зростає активний опір, у зв'язку із чим добротність котушки підвищується.

Індуктивні котушки із сердечником з магнітодіелектрика можуть мати змінну індуктивність, що забезпечує можливість настроювання контурів за допомогою переміщення рухомих сердечників (підлаштовувачів). Сердечники на основі карбонільного заліза відрізняються досить високою стабільністю, малими втратами, позитивним температурним коефіцієнтом магнітної проникності й можуть бути використані в широкому діапазоні частот.

Альсіфер, крім хороших магнітних властивостей, вигідно відрізняється від інших сплавів невисокою вартістю й недефіцитністю сировини. Залежно від вмісту кремнію й алюмінію його температурний коефіцієнт магнітної

проникності може бути позитивним, негативним або дорівнювати нулю. Змішанням порошків зі сплавів з позитивним і негативним  $\alpha_{\mu}$  можна створювати сердечники з термостабільними властивостями.

Магнітодіелектрики на основі молібденового пермалою мають найбільшу початкову магнітну проникність; втрати на гістерезис і вихрові струми для цих магнітодіелектриків при рівних значеннях  $\mu$  менше, ніж в альсіферових сердечників, а стабільність параметрів вище. Верхня межа робочих температур магнітодіелектриків 100...120 °С. Зміна початкової магнітної проникності з часом становить від 0,2 до 2 % у рік. Висока стабільність магнітних властивостей є важливою перевагою магнітодіелектриків перед іншими магнітом'якими матеріалами.

### 1.8 Магнітні матеріали спеціалізованого призначення

#### Ферити й металеві сплави із прямокутною петлею гістерезису (ППГ)

Магнітні матеріали із ППГ (табл. 5.3) широко застосовуються в пристроях автоматики, обчислювальної техніки, в апаратурі телеграфного зв'язку.

Таблиця 1.3 - Властивості сердечників і матеріалів із ППГ

Матеріал або сердечник	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$K_{пк}$ , не менше	$S_q$ , мкКл/м	$T_k$ , °С	Примітка
Ферити різних марок	10...1200	0,15...0,25	0,9	25...55	110...630	Є понад 25 різних марок
Мікронні сердечники з пермалоїв (товщина стрічки 2...10 мкм)	8...50	0,6...1,5	0,85...0,9	25...100	300...630	Сплави 50НП, 65Н, 79НМ, 34НКПМ

До матеріалів і виробів цього типу ставлять ряд специфічних вимог, а для їхньої характеристики залучають деякі додаткові параметри. Основним з таких параметрів є коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису  $K_{пк}$ , що є відношенням залишкової індукції  $B_r$  до максимальної індукції  $B_{max}$ :

$$K_{пк} = \frac{B_r}{B_{max}}$$
 Бажано, щоб  $K_{пк}$  був можливо ближчим до одиниці. Для

забезпечення швидкого перемагнічування сердечників вони повинні мати невеликий коефіцієнт перемикавання  $S_q$ , що чисельно дорівнює кількості електрики на одиницю товщини сердечника, яка є необхідною для перемагнічування його з одного стану залишкової індукції в протилежний стан максимальної індукції. Крім того, матеріали із ППГ повинні забезпечувати малий час перемагнічування, можливо більшу температурну стабільність магнітних характеристик, а, отже, мати високу температуру Кюрі й деякі інші властивості.

Сердечники з матеріалу із ППГ мають два стійких магнітних стани, що відповідають різним напрямкам залишкової магнітної індукції. Тому їх можна використати як елементи для зберігання й переробки двійкової інформації. Запис і зчитування інформації здійснюються перемиканням сердечника з одного магнітного стану в інший за допомогою імпульсів струму, що створюють необхідну напруженість магнітного поля. Двійкові елементи на магнітних сердечниках із ППГ характеризуються високою надійністю, малими габаритами, низькою вартістю, відносною стабільністю характеристик. Вони мають практично необмежений термін служби, зберігають записану інформацію при відключених джерелах живлення.

**Ферити із ППГ.** Специфічна форма петлі реалізується при виборі певного хімічного складу й умов спікання ферита, а не є результатом якої-небудь спеціальної обробки матеріалу, що призводить до утворення текстури.

При зростанні температури від  $-20$  до  $+60$  °C у феритів різних марок коерцитивна сила зменшується в  $1,5 \dots 2$  рази, залишкова індукція - на  $15 \dots 30$  %, коефіцієнт прямокутності - на  $5 \dots 35$  %. Технологія виготовлення сердечників з феритів із ППГ проста й економічна. З феритів із ППГ найбільш широке застосування знаходять **магній-марганцеві й літієві ферошпінелі**.

В запам'ятовувальних пристроях ЕОМ застосовують або кільцеві феритові сердечники малого розміру (є сердечники із зовнішнім діаметром  $(0,3 \dots 0,4)$  мм), або багатоотворні феритові плати, в яких область навколо кожного отвору виконує функції окремого сердечника. При використанні сердечників досягається більш висока швидкодія.

**Стрічкові мікронні сердечники з пермалоїв** мають кращі магнітні властивості (дивись табл. 1.3) у порівнянні з феритами й більш високу температурну стабільність. У тому ж інтервалі температур ( $-20 \dots +60$  °C) властивості їх практично не змінюються. В мікромініатюрних електронних приладах використовують магнітні плівки, нанесені на підкладки методами розпилення у вакуумі.

**Ферити для пристроїв НВЧ.** Діапазон НВЧ відповідає довжинам хвиль від  $1$  м до  $1$  мм.

Електромагнітні хвилі можуть поширюватися в просторі, заповненому діелектриком, а від металів вони майже повністю відбиваються. Тому металеві поверхні використовують для спрямування хвиль, їхньої концентрації або розсіювання. Електромагнітна енергія НВЧ найчастіше передається по хвилеводах, що є порожніми або частково заповненими твердими матеріалами металевими трубами. Як тверді матеріали для керування потоком енергії у хвилеводах використовують ферити НВЧ, магнітними характеристиками яких можна управляти за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Ферити використовуються в ряді НВЧ-пристроїв – в антенних перемикачах й циркуляторах, що служать для розподілу енергії між окремими хвилеводами; в фазообертачах; фільтрах; модуляторах, обмежниках потужності й ін.

До феритів НВЧ пред'являють ряд специфічних вимог:

- 1) досягнення вузької лінії резонансу;
- 2) висока чутливість матеріалу до керуючого поля (можливість керування відносно слабким зовнішнім полем);
- 3) високий питомий об'ємний опір ( $10^6 \dots 10^8$  Ом·м) і можливо менший тангенс кута діелектричних втрат ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$ ), а також можливо менше значення магнітних втрат поза областю резонансу, що забезпечує мале загасання у фериті;
- 4) температурна стабільність властивостей і можливо більш високе значення точки Кюрі.

Більшість вимог задовольняється при використанні **магній-маргацевих феритів** з великим вмістом окису магнію. Для деяких цілей застосовують **літій-цинкові** й **нікель-цинкові** ферити й ферити складного складу (поліферити).

**Монокристали ферогранату ітрія**  $Y_3Fe_5O_{12}$  характеризуються досить низькими діелектричними й магнітними втратами, слабкою анізотропією, найбільш вузькою резонансною кривою,  $H = 10 \dots 100$  А/м. Вони є найпоширенішими серед феритів, застосовуваних у низькочастотній частині діапазону НВЧ.

**Магніострикційні матеріали** – це матеріали, застосування яких засновано на явищі магніострикції й магнітопружному ефекті, тобто зміні розмірів тіла в магнітному полі й зміні магнітних властивостей матеріалу під дією механічних впливів. Магніострикційними матеріалами для високих частот є ферити. Магніострикційні коливання невеликої амплітуди в намагніченому середовищі за своїм зовнішнім проявом аналогічні п'єзоелектричним. Тому їх іноді називають п'єзомагнітними.

В минулому найбільш широко застосовуваним магніто-стрикційним матеріалом був **нікель**. Цінними властивостями нікелю є висока стійкість до корозії й малий температурний коефіцієнт модуля пружності. Сплав **платини із залізом** має велику константу магнітострикції, однак він дуже дорогий й тому має досить обмежене застосування. Недоліком **залізокобальтових і залізоалюмінієвих сплавів** є крихкість, що утрудняє механічну обробку, і низька антикорозійна стійкість, що перешкоджає використанню таких перетворювачів у водному середовищі.

Широке застосування в магнітострикційних пристроях знаходить **феритова кераміка**. Завдяки високому питомому опору в неї дуже малі втрати на вихрові струми, вона не піддається дії хімічно агресивних середовищ. За допомогою керамічної технології можна виготовити перетворювачі практично будь-яких форм і розмірів. За складом магнітострикційна кераміка є або чистим **феритом нікелю** ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ), або твердим розчином на його основі.

З магнітострикційних матеріалів виготовляють сердечники електромеханічних випромінювачів і приймачів для електроакустики й ультразвукової техніки, сердечники електромеханічних і магнітострикційних фільтрів і резонаторів, ліній затримки, як чутливі елементи магнітопружних перетворювачів, застосовуваних у пристроях автоматики.

## 1.9 Магнітотверді матеріали

**Класифікація й властивості.** Магнітотверді матеріали відрізняються від магнітом'яких високою коерцитивною силою. Площа гістерезисної петлі в магнітотвердих матеріалів значно більше, ніж у магнітом'яких. За застосуванням магнітотверді матеріали можна поділити на матеріали для постійних магнітів і матеріали для запису й тривалого зберігання звуку, зображення й т.п.

Властивості магнітотвердих матеріалів характеризуються кривою розмагнічування, що є ділянкою граничної гістерезисної петлі (рис. 5.14).

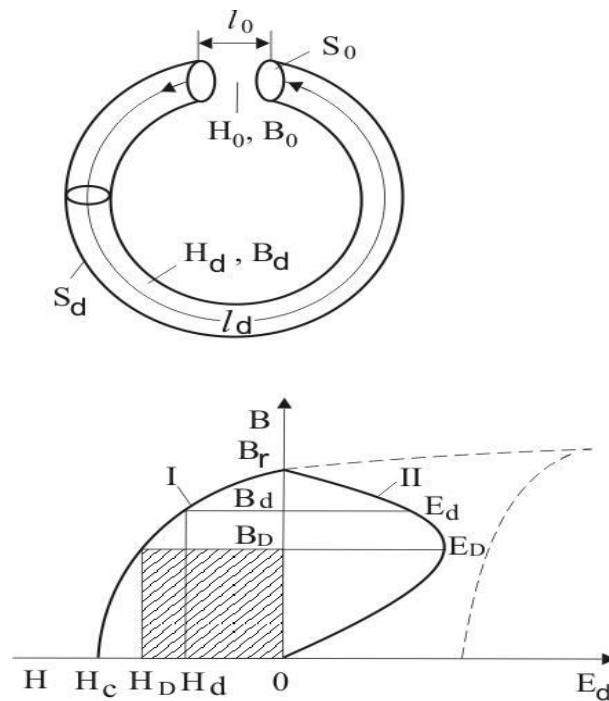


Рисунок 1.10 - Криві розмагнічування (I) і магнітної енергії в повітряному зазорі (II) постійного магніта

З рис. 1.10 видно, що при деяких значеннях  $B_D$  і  $H_D$  енергія досягає максимального значення  $E_D = \frac{B_D H_D}{2} = E_{dmax}$ , що є найбільш важливою характеристикою якості матеріалів, використовуваних для виготовлення постійних магнітів. Нерідко для характеристики таких матеріалів користуються добутком  $B_D \cdot H_D$ , опускаючи множник  $1/2$ . Графічно енергію  $E_d$  у певному масштабі можна представити площею прямокутника зі сторонами  $B_d$  і  $H_d$  (на рисунку 5.10 заштрихований прямокутник, що характеризує  $E_{dmax}$ ).

Форму кривої розмагнічування прийнято характеризувати коефіцієнтом опуклості  $\eta_B$ , під яким розуміють відношення  $\eta_B = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}$ . З посиленням прямокутності петлі гістерезису коефіцієнт опуклості наближається до одиниці.

Чим більше залишкова індукція  $B_r$ , коерцитивна сила  $H_c$  і коефіцієнт опуклості  $\eta_B$ , тим більше максимальна енергія магніту.

Більша коерцитивна сила виникає в матеріалі, що складається з однодомених частинок, у яких велика енергія магнітної кристалографічної анізотропії або анізотропії форми.

**Литі висококоерцитивні сплави.** До цієї групи належать сплави систем Fe–Ni–Al і Fe–Ni–Co–Al, модифіковані різними добавками. Вони є активними

елементами багатьох приладів і характеризуються сприятливим співвідношенням між магнітними властивостями й вартістю виробництва.

У потрійній системі **Fe–Ni–Al** найбільшу питому магнітну енергію мають сплави, що містять близько 28 % Ni і 14 % Al (за масою), що приблизно відповідає інтерметалічній сполуці  $\text{Fe}_2\text{NiAl}$ . В ці сплави додають легуючі елементи – кобальт, мідь, титан і ніобій, що не тільки поліпшує магнітні властивості, але й послабляє їх залежність від невеликих змін хімічного складу, наявності домішок і відхилень від заданого режиму термообробки.

Магнітні властивості магнітотвердих матеріалів залежать від кристалографічної й магнітної текстур. **Магнітна текстура** висококоерцитивних сплавів створюється шляхом їхнього охолодження в сильному магнітному полі. При цьому досягається впорядковане розташування пластинчастих виділень сильно-магнітної фази, які своїми осями легкого намагнічування орієнтуються в напрямку поля. Текстуrowаний матеріал магнітно анізотропний; найкращі властивості в нього виявляються в тому напрямку, у якому при охолодженні на нього діяло магнітне поле.

**Кристалічну текстуру** створюють методом спрямованої кристалізації сплаву, залитого у форму, використовуючи особливі умови тепловідводу. Сплави, виготовлені спрямованою кристалізацією, мають специфічну стовпчасту макроструктуру. Сполучення кристалічної й **магнітної текстур** дозволяє поліпшити всі параметри магнітотвердого матеріалу ( $B_r$ ,  $H_c$ ,  $\eta_v$ ).

Недоліком сплавів типу Fe-Ni-Al і Fe-Ni-Al-Co є труднощі виготовлення з них виробів точних розмірів внаслідок крихкості й високої твердості. У марках сплавів прийняті наступні позначення: Ю - алюміній, Н - нікель, Д - мідь, К - кобальт, Т - титан, Б - ніобій, А - стовпчаста кристалічна текстура. Магнітна текстура не позначається, але мається на увазі завжди при вмісті кобальту в сплаві понад 15 %. Цифра в маркуванні підкреслює вміст того металу, буква якого стоїть перед цією цифрою.

**Безкобальтові сплави** (ЮНД) найбільш дешеві. Сплави, що містять кобальт (ЮНДК15, ЮНДК18 і ін.), застосовують у тих випадках, коли потрібні підвищені магнітні властивості й потрібний ізотропний магнітний матеріал. Сплави з 24 % кобальту, що мають високі магнітні властивості в напрямку магнітної текстури, використовують при спрямованому магнітному потоці. Сплави зі спрямованою кристалізацією, наприклад ЮН13ДК25БА, ЮНДК35Т5БА, мають найбільший запас магнітної енергії ( $e_{\max} = 35 \dots 40$  кДж/м<sup>3</sup>). При великому повітряному зазорі перевагу треба віддавати сплавам з найбільшою коерцитивною силою, наприклад, сплавам, що містять титан – ЮНДК40Т8 ( $H_c \geq 145$  кА/м) і ін. Досить високі магнітні властивості мають



монокристалічні матеріали марок ЮНДК35Т5АА, ЮНДК40Т8АА (символ АА означає монокристалічну структуру). Однак вони досить дорогі, тому промисловістю виробляються в обмежених масштабах.

**Магніти з порошків.** Немоżliвість виготовити особливо дрібні вироби зі строго витриманими розмірами з литих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів обумовила використання методів порошкової металургії для виробництва постійних магнітів. **Металокерамічні магніти** виробляють шляхом пресування порошку, що складається зі здрібнених тонкодисперсних магнітотвердих сплавів, і подальшим спіканням при високих температурах за аналогією із процесами випалу кераміки. Дрібні деталі при такій технології виходять досить точних розмірів і не вимагають подальшої обробки. Процес виготовлення **металопластичних магнітів** аналогічний процесу пресування деталей із пластмас, тільки в порошку міститься наповнювач у вигляді зерен здрібненого магнітотвердого сплаву. Металопорошкові магніти економічно вигідні при масовому автоматизованому виробництві, складній конфігурації й невеликих розмірах магнітів. Металопластична технологія дозволяє одержувати магніти з арматурою.

Металокерамічні магніти звичайно мають пористість 3...5 %, а запасена магнітна енергія й залишкова індукція в них на 10...20 % нижче, ніж у литих магнітів з відповідного сплаву, зате за механічною міцністю вони перевершують литі магніти в 3...6 разів. Магнітні властивості металопластичних магнітів досить низькі. Коерцитивна сила в порівнянні з литими магнітами нижче на 10...15 %, залишкова індукція - на 35...50%, а запасена магнітна енергія - на 40...60 %. Зниження магнітних властивостей пояснюється більшим вмістом (до 30 %) немагнітної зв'язувальної речовини.

Недоліками металокерамічних магнітів є низька механічна міцність, велика крихкість, сильна залежність магнітних властивостей від температури.

**Магнітотверді ферити.** З магнітотвердих феритів (табл. 5.4) найбільш відомий **барієвий ферит**  $\text{Ba} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  (фероксдюр).

На відміну від магнітом'яких феритів він має не кубічну, а гексагональну кристалічну решітку з одноосьовою анізотропією. Промисловість випускає два види барієвих магнітів: марок БІ (барієві ізотропні) і марок БА (барієві анізотропні). Висока коерцитивна сила в цих матеріалів обумовлена малим розміром кристалічних зерен і сильною магнітною кристалографічною анізотропією. Для додання анізотропії магнітних властивостей в матеріалі створюється текстура шляхом формування маси в сильному магнітному полі (з напруженістю 650...800 кА/м). Поле відключають після повного видалення вологи із пресованого порошку й досягнення необхідного тиску в прес-формі.

Таблиця 1.4 - Магнітні властивості магнітів із ферита барія і ферита кобальта

Марка	$E_{\max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл
БІ	3,2	112	0,19
БІС	3,6	828	0,21
2,4 БА	9,6	224	0,33
3,1 БА	12,4	168	0,38
3БА2	10,4	240	0,35
1,5 КА	5,6	128	0,24
2КА	7,2	128	0,28

**Барієві магніти** виготовляють у вигляді шайб і тонких дисків. Вони мають високу стабільність стосовно впливу зовнішніх магнітних полів і не бояться тряски й ударів. Густина барієвого ферита 4,4...4,9 Мг/м<sup>3</sup>, приблизно в 1,5...1,8 разів менше густини литих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів (~7,3...7,8 Мг/м<sup>3</sup>). Такі магніти виходять легкими й дешевими. Питомий опір барієвого фериту  $10^4 \dots 10^7$  Ом·м, тобто в  $10^6$  разів вище, ніж у литих металевих магнітотвердих сплавів. Магніти з барієвого фериту можна використовувати при високих частотах.

**Кобальтові магніти** характеризуються більшою температурною стабільністю в порівнянні з барієвими (дивись табл. 1.4). Вартість магнітів з кобальтових феритів вище, ніж барієвих.

**Сплави на основі рідкоземельних елементів.** Рідкоземельні елементи, що є металами (РЗМ), утворюють велику кількість бінарних сполук з металами перехідної групи, що мають гексагональну структуру. Їм властива сильна магнітна кристалографічна анізотропія й висока температура Кюрі. Найбільш висока намагніченість насичення спостерігається в сполук кобальту (табл. 5.5) з елементами першої половини ряду лантаноїдів. При температурі нижче деякого критичного значення ці сполуки метастабільні й розпадаються на дві фази, що є однією з причин появи високої коерцитивної сили в матеріалі.

Найпоширенішим способом виготовлення магнітів є їхнє спікання з порошків у присутності рідкої фази.

Таблиця 1.5 - Магнітні характеристики матеріалів на основі рідкоземельних елементів

Склад	$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл	$E_{\max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$T_k$ , °С
SmCo <sub>5</sub>	560	0,92	75	725

$\text{PrCo}_5$	415	0,94	56	610
$\text{Sm}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Co}_5$	700	0,93	80	-

### Питання для самоперевірки

1. Як класифікують речовини за магнітними властивостями?
2. Чим відрізняється обмінна взаємодія у феро- і антиферомагнетиків?
3. Чи можуть мати феромагнітні властивості сплави, що складаються з неферомагнітних елементів?
4. Чим обумовлені напрямки намагніченостей у доменах і розташування їхніх границь при відсутності зовнішнього магнітного поля?
5. Що розуміють під енергією природної магнітної кристалографічної анізотропії?
6. Які процеси відбуваються у феромагнетик у його намагнічуванні зовнішнім полем? Що називають основною кривою намагнічування магнітного матеріалу?
7. Як залежить статична магнітна проникність феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля?
8. У чому полягає явище магнітострикції? Який його вплив на процес намагнічування феромагнетика?
9. Як змінюється індукція насичення феромагнетика при збільшенні температури?
10. Які причини появи магнітних втрат при циклічному перемагнічуванні феромагнетиків? Які способи зменшення магнітних втрат Вам відомі?
11. Чому змінний магнітний потік нерівномірно розподіляється по перетині суцільного магнітоводу? Як це позначається на значенні ефективної магнітної проникності сердечника?
12. Які матеріали називаються феритами?
13. Що таке точка компенсації й у яких матеріалах вона спостерігається?
14. У яких магнітних матеріалах і за яких умов можна створити циліндричні магнітні домени (ЦМД)? На чому засноване застосування ЦМД в обчислювальній техніці?
15. Як класифікують магнітні матеріали за властивостями і технічним призначенням?
16. Які магнітом'які матеріали мають високе значення магнітної проникності в слабких магнітних полях?
17. Який вплив домішки кремнію на властивості електротехнічної сталі?

18. Чим розрізняються властивості високонікелевого й низьконікелевого пермалоїв? Яка природа цих розходжень?
19. Чому ферити з високою початковою магнітною проникністю мають невисоку точку Кюрі?
20. Які частотні характеристики високопроникних і низькопроникних феритів?
21. У чому подібність і розходження магнітних властивостей феритів і феромагнетиків?
22. Яка будова магнітодіелектриків і як вони використовуються?
23. Які магнітні матеріали мають прямокутну петлю гістерезису? Яке їхнє основне застосування?
24. Які фізичні ефекти лежать в основі застосування НВЧ-феритів?
25. Які матеріали мають сильно виражену магнітострикцію? Наведіть приклади практичного використання цього явища.
26. Назвіть найважливіші характеристики магнітотвердих матеріалів.
27. Як пояснюється наявність високої коерцитивної сили в магнітотвердих сплавах на основі Al-Ni-Fe?
28. Яким чином створюють текстуру в магнітах з фериту барію?

### Задачі

1. При напруженості магнітного поля  $H = 10^4$  А/м магнітна індукція у вісмуті  $B = 12,564$  мТл. Визначити магнітну сприйнятливість  $\chi_m$  речовини. Який висновок можна зробити про природу намагніченості?
2. Визначити питомі магнітні втрати на вихрові струми в сердечнику трансформатора, зібраному з листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм, якщо на сердечник впливає магнітний потік, що змінюється за синусоїдальним законом, із частотою 50 Гц і максимальною індукцією 0,5 Тл, обумовлений проходженням змінного струму  $i$  по обмотці. Питомий опір сталі прийняти рівним 0,5 мкОм·м.

#### Розв'язання

Вихрові струми  $i_{в.стр}$  виникають у площині, розташованій перпендикулярно вектору магнітної індукції  $B$ . У збірному сердечнику трансформатора тонкий плоский лист довжиною  $l$ , висотою  $b$  і товщиною  $h$  (рис. 1.11) пронизується змінним магнітним потоком, спрямованим уздовж площини листа. У цьому випадку більші сторони кіп-турів вихрових струмів паралельні сторонам перетину листа.

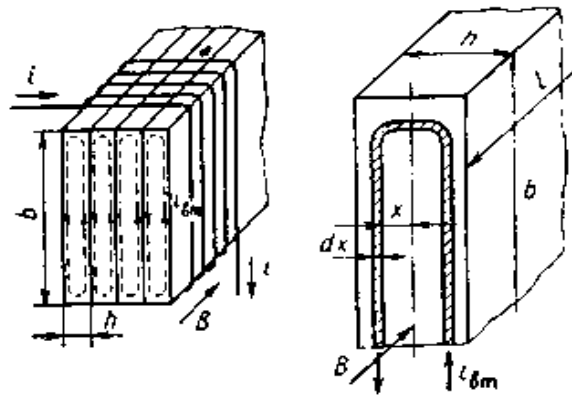


Рисунок 1.11 – Схема сердечника трансформатора

Виділимо в тілі листа порожній циліндр із основиною, обмеженою двома контурами вихрового струму. Більші сторони цих контурів відстоять від вертикальної осі перетину листа відповідно на  $x$  і  $x + dx$ . Тому що  $h \ll b$ , то можна вважати, що довжина великої сторони контуру вихрового струму дорівнює висоті листа  $b$ . Тоді магнітний потік, що пронизує порожнину циліндра,  $\Phi_x = 2 \times bV$ . Діюче значення е.р.с., що індукується змінним потоком у стінці циліндра:  $U_x = \omega \Phi_x = 4\pi f x b = 4\pi f x b B_m / \sqrt{2}$ .

Втрати на вихрові струми в циліндрі:  $dP_{вт} = U_x^2 d\sigma_x$ , де  $d\sigma_x$  - активна провідність виділеного циліндра.

З огляду на те, що поперечний переріз циліндра для вихрового струму дорівнює  $l dx$ , для провідності циліндра одержимо  $d\sigma_x = l dx / (2b\rho)$ . Звідси:

$$dP_{вт} = \frac{U_x^2 l}{2b\rho} dx = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B_m^2}{\rho} dx.$$

Потужність  $P_T$ , що виділяється за рахунок протікання вихрових струмів у всьому листі, знайдемо як суму елементарних потужностей, створюваних всіма контурами вихрових струмів. Інтегруючи, одержимо:

$$dP_{вт} = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B_m^2}{\rho} \int_0^{h/2} x^2 dx = \frac{\pi^2}{6} \frac{B_m^2 h^3 b l f}{\rho} = 1,643 f B_m^2 h^2 V / \rho, \text{ де } V = h b l - \text{об'єм листа.}$$

Таким чином, питомі втрати на вихрові струми в сердечнику трансформатора  $p = 1,643 f B_m^2 h^2 V / \rho = \frac{1,643 \cdot 0,25 \cdot 50 \cdot (3,5 \cdot 10^{-4})^2}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ Вт/м}^3$ .

3. У сердечнику трансформатора на частоті 50 Гц втрати на гістерезис при індукції магнітного поля 0,1 і 0,5 Тл становлять 0,15 і 1,97 Вт/кг, відповідно. Визначити втрати на гістерезис на частоті 200 Гц при індукції магнітного поля 0,6 Тл.

Розв'язання

Втрати на гістерезис в одиниці об'єму феромагнетика визначаються виразом  $P_r = \eta B_m^n f$ . Звідси знаходимо:  $\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{\eta B_{m2}^n f}{\eta B_{m1}^n f} = \left(\frac{B_{m2}}{B_{m1}}\right)^n$ ;  $n =$

$$\frac{\lg(P_{r2}/P_{r1})}{\lg(B_{m2}/B_{m1})} = \frac{\lg(1,97/0,15)}{\lg(0,5/0,1)} = 1,6; \quad \eta = \frac{P_r}{B_m^n f} = \frac{1,97}{(0,5)^{1,6} \cdot 50} = 0,12 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{Тл}^{1,6}).$$

Оскільки коефіцієнти  $n$  і  $\eta$  не залежать від частоти й магнітної індукції, відшуквані втрати  $P_{r3} = 0,12(0,6)^{1,6} \cdot 200 = 10,6 \text{ Вт/кг}$ .

4. У сердечнику трансформатора питомі магнітні втрати на гістерезис і на вихрові струми при частоті 2 кГц рівні й становлять 2 Вт/кг. Визначити сумарні питомі магнітні втрати в сердечнику на частоті 400 Гц, якщо максимальна магнітна індукція в ньому та ж, що й на частоті 2 кГц.

5. На частоті 50 Гц питомі втрати на вихрові струми в сердечнику з електротехнічної сталі при індукції магнітного поля  $B = 1,2 \text{ Тл}$  становлять 6,5 Вт/кг. Визначити втрати на вихрові струми в сердечнику на частоті 400 Гц при магнітній індукції 0,5 Тл, якщо маса сердечника  $m = 0,5 \text{ кг}$ .

6. Знайти питомі магнітні втрати у феритовом сердечнику марки 2000 НН, що перемагнічується на частоті 0,1 МГц магнітним полем напруженістю  $H_m = 4 \text{ А/м}$ , якщо в даних умовах  $\text{tg}\delta_m = 0,2$ , магнітна проникність  $\mu = 2500$ .

7. Кільцевий сердечник розмірами  $R \times r \times h = 16 \times 8 \times 8 \text{ мм}$ , виготовлений з фериту марки 20000 НМ, на частоті 0,01 МГц має  $\text{tg}\delta_m = 0,5$ . На сердечник намотана обмотка з 20 витків. Знайти еквівалентний опір втрат у сердечнику в слабких магнітних полях.

8. Кільцевий феритовий сердечник масою  $m = 0,1 \text{ кг}$  перемагнічується змінним магнітним полем напруженістю  $H_m = 1 \text{ кА/м}$  частотою  $f = 10^4 \text{ Гц}$ . Визначити потужність, виділювану в сердечнику, якщо магнітна проникність матеріалу  $\mu = 1000$ ;  $\text{tg}\delta_m = 2 \cdot 10^{-2}$ ; густина фериту  $d = 4,5 \text{ Мг/м}^3$ .

9. Котушка з феритовим тороїдальним сердечником діаметром 10 мм має індуктивність 0,12 Гн і містить 1000 витків. Визначити струм у котушці, при якому магнітна індукція в сердечнику дорівнює 0,1 Тл.

## 2 РЕЗИСТОРИ

Резистор - це один з найбільш широко розповсюджений навісний компонент радіоелектронної апаратури. Його **призначення** – здійснювати опір протіканню електричного струму.

Резистор характеризується зосередженим опором протіканню електричного струму, набагато більшим за опір підводячих струм провідників.

### 2.1 Основні параметри резисторів

**Номінальний опір** – це електричний опір, значення якого відповідає нормативній документації (ГОСТам, технічним умовам) і позначене на резисторі та є вихідним для відліку відхилень від цього значення.

Номінальний опір резистора звичайно вказують на електричних принципових схемах поряд з позиційним позначенням резистора.

Фактичний опір кожного екземпляра резистора може відрізнятись й відрізняється від номінального, але не більше ніж на величину **припустимого відхилення**. Промисловістю випускаються резистори з номінальним опором від часток Ома до декількох Мегаом. В радіоелектроніці для позначення номінальних опорів використовуються кратні Ому величини: 1 кілоом (кОм) =  $10^3$  Ом, 1 МегаОм (МОм) =  $10^6$  Ом, 1 ГигаОм (ГОм) =  $10^9$  Ом.

Всі значення номіналів резисторів розбиті на декади, а в межах кожної декади розподілені у відповідності зі стандартизованими рядами номіналів. Наприклад, для декади від одного до десяти Ом із припустимим відхиленням в 20 % значення номіналів: 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10. Ця послідовність чисел має позначення - ряд E6, тобто на інтервалі в одну декаду укладається шість номінальних значень. Для допустимого відхилення 10 % використовується ряд E12, який окрім зазначених вище номіналів включає додатково шість проміжних значень номіналів. Існують ряди номіналів E24, E48, E96, E192. Значення номіналів інших декад одержують шляхом множення номінальних значень першої декади на  $10^n$ , де n - ціле позитивне або негативне число.

**Припустиме відхилення** характеризує ступінь розкиду, відхилення опору від номінального значення для резисторів даного класу точності. Припустиме відхилення вказується в процентах від номіналу. Припустимі відхилення номіналів резисторів загального призначення досить великі - 20, 10, 5 %. Для високо прецизійних резисторів допуск на відхилення може досягати значень в 0,1%.

При протіканні електричного струму через резистор в ньому виділяється тепло, резистор нагрівається. Величина потужності, яку має розсіяти резистор,  $P = I^2 R$ . Звичайно нормується номінальне значення розсіюваної потужності.

**Номінальна потужність розсіювання** - це максимально допустима потужність у Ватах (Вт), що розсіюється на резисторі, при якій параметри резистора зберігаються у встановлених межах протягом тривалого часу, так званого терміну служби. Напруга на резисторі повинна не перевищувати номінальної величини  $U_{\text{ном}} = \sqrt{P_{\text{ном}} \cdot R}$ , де  $P_{\text{ном}}$  - номінальна потужність, Вт;  $R$  - опір, Ом.

Номінальну потужність розсіювання резисторів обирають з номінального ряду 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5 і т.д. Вт. Як показано на рис. 6.1, на принципових електричних схемах номінальну потужність розсіювання позначають умовно рисочками на зображенні резистора для потужностей менших 1 Ват й римськими цифрами при потужностях, вищих за 1 Ват.

**Температурний коефіцієнт опору (ТКО)** - відносна зміна опору резистора при зміні температури навколишнього середовища на 1°C.

Резистори можуть мати позитивний ТКО, коли опір резистора збільшується з ростом температури, і негативний ТКО, коли опір резистора зі зростанням температури зменшується. ТКО характеризує зворотні зміни опору резистора. Чим менший ТКО, тим краща температурна стабільність резистора.

ТКО може змінюватися в інтервалі температур. У деяких резисторів змінюється і знак ТКО. Великим номінальним опорам резистора відповідає більший ТКО.

**Електрична міцність** резистора характеризується граничною напругою, при якій резистор може працювати протягом терміну служби без електричного пробою. Гранична робоча напруга резистора залежить від атмосферного тиску, температури і вологості повітря.

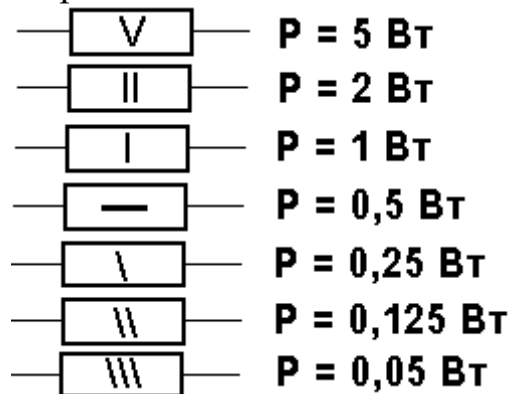


Рисунок 2. 1 – Умовні позначення номінальної потужності розсіювання резисторів на принципових електричних схемах



**Рівень власних шумів** резистора визначається випадковими коливаннями різниці потенціалів, що виникають на резистивному елементі внаслідок флуктуацій об'ємної концентрації носіїв заряду і флуктуацій його електричного опору. Електрорушійна сила (е.р.с.) шумів дротяних резисторів, а також недротяних, до яких не прикладена напруга, при 20 °С в смузі частот  $\Delta f$ :

$$E_{\text{ш}} \approx 0,125\sqrt{\Delta f \cdot R},$$

де  $E_{\text{ш}}$  – е.р.с. шумів, мкВ;  $\Delta f$  - смуга частот, кГц.

Рівень шумів недротяних резисторів, до яких прикладена постійна напруга  $U_0$ , характеризується відношенням середньоквадратичного (ефективного) значення е.р.с. шумів  $E_{\text{ш}}$  до напруги  $U_0$ . За рівнем шумів стандартні недротяні резистори поділяються на дві групи. До першої відносяться резистори, рівень шумів яких не більше 1 мкВ/В, до другої - резистори, рівень шумів яких не більше 5 мкВ/В в смузі частот 60 Гц...6кГц.

Цей параметр відіграє істотну роль в електронних підсилювачах з великим коефіцієнтом підсилення.

**Частотні властивості** резистора визначаються номінальним опором і розподіленими реактивними (паразитними) параметрами (індуктивністю і ємністю). Активний опір резистора на змінному струмі залежить як від його номінального опору, так і від його ємності і індуктивності. В свою чергу, власна розподілена ємність і індуктивність резистора залежать від його форми і числа витків спіральної нарізки резистивного елементу. У високоомних резисторів активний опір зменшується з підвищенням частоти. Повний опір низькоомних резисторів, які не мають нарізки резистивного елементу, із зростанням частоти зростає і на частоті резонансу досягає максимуму.

### Вольт-амперна характеристика резистора

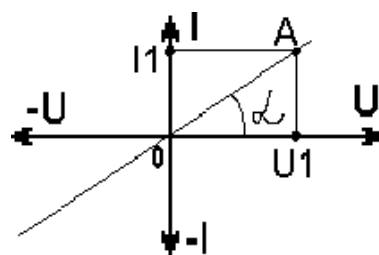


Рисунок 2.2 - Вольт - амперна характеристика (ВАХ) лінійного резистора

Поводження резистора при включенні його в електричний ланцюг характеризується його електричними параметрами й характеристиками. Функціональна залежність між величиною прикладеної напруги й значенням електричного струму, що протікає через резистор відповідно до закону Ома, називається вольт - амперною характеристикою (ВАХ) (рис. 2.2).

Якщо до резистора прикладена позитивна напруга, струм протікає у позитивному напрямку. При зміні полярності прикладеної напруги, напрямок струму також змінюється на протилежний.

## 2.2 Класифікація резисторів

**За виглядом вольт-амперної характеристики** розрізняють резистори лінійні (з лінійною вольт - амперною характеристикою, рис. 2.2) і нелінійні (ВАХ має нелінійний характер) постійного і змінного опору.

У нелінійних резисторах в якості струмопровідного елемента застосовуються різні напівпровідникові матеріали.

**За конструкцією** резистори поділяються на плівкові, об'ємні і дротяні, а **за матеріалом** струмопровідного (резистивного) елемента - на плівкові, вуглецеві, метало-плівкові, метало-окисні, метало-діелектричні, композиційні і напівпровідникові.

**За способом захисту резистивного елемента** розрізняють резистори неізолювані, ізолювані (лаковані), компаундовані, опресовані пластмасою, герметизовані і вакуумовані.

**За призначенням** резистори поділяються на резистори загального і спеціального застосування. До резисторів загального застосування не ставляться підвищені вимоги відносно точності їх виготовлення і стабільності параметрів. До резисторів спеціального застосування можна віднести резистори підвищеної стабільності, високочастотні, високомегаомні, а також резистори для мікромодулів і мікросхем.

## 2.3 Резистори постійного опору

**Вуглецеві резистори.** Резистивний елемент цих резисторів є тонкою плівкою вуглецю, осаджену на основу з кераміки. В якості основи звичайно використовуються стрижні або трубки. Вуглецеві резистори характеризуються високою стабільністю опору, низьким рівнем власних шумів, невеликим негативним ТКО, слабкою залежністю опору від частоти і прикладеної напруги. Боровуглецеві резистори типу БЛП за стабільністю

опору можуть не поступатися дротяним резисторам. ТКО цих резисторів -  $(0,012...0,025)\%/^{\circ}\text{C}$ .

**Композиційні резистори.** Резистивний елемент цих резисторів виготовляють на основі композицій, що складаються з суміші порошкоподібного провідника (сажа, графіт та ін.) і органічного або неорганічного діелектрика. Композиційні резистори випускають плівкові та об'ємні. Плівкові композиційні резистори за конструкцією подібні вуглецевим, але відрізняються більшою товщиною плівки. Об'ємні резистивні елементи виготовляють у вигляді стрижня шляхом пресування композиційної суміші, плівкові - шляхом нанесення композиційної суміші на ізоляційну основу.

**Плівкові композиційні резистори** характеризуються сильною залежністю опору від напруги, низькою стабільністю параметрів і дуже високою надійністю. Об'ємні композиційні резистори з органічними пов'язуючими матеріалами відрізняються високою стабільністю параметрів, порівняно низькою надійністю і зниженим рівнем власних шумів, а з неорганічними пов'язуючими матеріалами - дуже високою надійністю, низькою стабільністю опору при зміні частоти до 50 кГц. Опір цих резисторів практично не залежить від напруги.

**Металоплівкові** резистори містять резистивний елемент у вигляді дуже тонкої (десяті долі мікрметра) металеві плівки, осадженої на основу з кераміки, скла, шаруватого пластика, ситалу або іншого ізоляційного матеріалу. Металоплівкові резистори характеризуються високою стабільністю параметрів, слабкою залежністю опору від частоти і напруги та високою надійністю. Недоліком деяких металоплівкових резисторів є знижена надійність при підвищеній номінальній потужності, особливо при імпульсному навантаженні. ТКО резисторів типів ОМЛТ не перевищує 0,02. Рівень шумів резисторів групи А не більше за 1мкВ/В, групи Б- не більше за 5мкВ/В.

Для виготовлення тонкоплівкових резисторів звичайно потрібні плівки з поверхневим опором 500...1000 Ом. У якості резистивних матеріалів найбільш часто використовують тугоплавкі метали (вольфрам, молібден, тантал, реній, хром) і сплав нікелю із хромом. Плівкові резистори із чистих металів мають ту перевагу, що вони постійні за складом й тому легше забезпечується однорідність їхньої структури. А це, у свою чергу, приводить до підвищеної стабільності електричних параметрів. Деякі характеристики резистивних плівок з тугоплавких металів наведені на рис. 6.3.

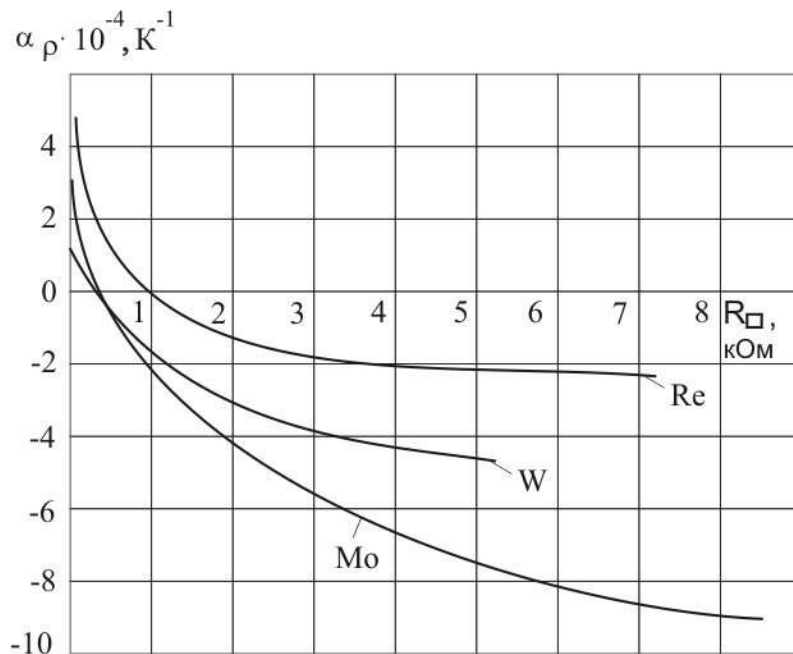


Рисунок 2.3 – Взаємозв'язок між електричними параметрами резистивних металевих плівок

**Металоокисні** резистори виготовляються на основі оксидів металів, найчастіше двоокису олова. За конструкцією вони не відрізняються від металоплівкових, характеризуються середньою стабільністю параметрів, слабкою залежністю опору від частоти і напруги, високою надійністю.

**Дротяні** резистори постійного опору звичайно виконують на циліндричній ізоляційній основі з одно- або багат шаровою обмоткою. Дріт і контактні вузли захищають, як правило, емалевими покриттями. Дротяні резистори характеризуються високою стабільністю опору, низьким рівнем власних шумів, великою допустимою потужністю розсіяння, високою точністю опору. Ці резистори мають порівняно великі паразитні реактивні параметри і тому застосовуються лише на порівняно низьких частотах. Як обмотувальні дроти використовуються дроти високого опору. Для зменшення паразитних параметрів дротяних резисторів застосовують намотування спеціальних видів.

## 2.4 Терморезистори

Терморезистор - це лінійний або нелінійний резистор, опір (провідність) якого значно залежить від температури.

Таку властивість мають і метали, і напівпровідники.

Терморезистори з платини, міді і інших металів виготовляють у формі дроту діаметром 0,04...0,08мм, біфілярно намотаною на ізоляційний каркас і

поміщеною в герметичний корпус. Такі терморезистори мають невеликий температурний коефіцієнт опору (0,4...0,5 %/°C) і значні габаритні розміри.

Терморезистори на основі напівпровідників мають достатньо великий опір, в порівнянні з металевими, менші габаритні розміри (десяті долі міліметра) і в 10...20 разів більший ТКО. Вони простіші за конструкцією і надійніші в експлуатації. Тому напівпровідникові терморезистори мають ширше застосування.

Із зростанням температури опір металу збільшується (див. п. 2.1), що пояснюється збільшенням розсіяння вільних електронів на теплових коливаннях решітки. Тому температурний коефіцієнт опору металевих терморезисторів позитивний.

Більшість напівпровідникових терморезисторів мають негативний температурний коефіцієнт опору, що зі зростанням температури питомий опір напівпровідників зростає (див. п. 3.2, рис. 3.8).

Для виготовлення терморезисторів застосовують оксидні напівпровідники  $Mn_3O_4$ ,  $Co_3O_4$ ,  $CoO$ ,  $CuO$ , кобальтово-марганцеві, мідно-марганцеві і ін.

Терморезистори застосовуються для вимірювання і регулювання температури, температурної компенсації різних елементів електричних ланцюгів, в схемах стабілізації напруги, рівня сигналу на виході підсилювача і інших цілей. Залежно від цього вони діляться на наступні групи:

- 1) терморезистори для вимірювання і регулювання температури;
- 2) термокомпенсатори;
- 3) терморезистори для теплового контролю;
- 4) терморезистори для стабілізації напруги;
- 5) вимірювальні терморезистори (термістори), зокрема, болометри (для індикації і вимірювання теплового випромінювання).

Конструктивно робочий елемент терморезистора робиться у вигляді пластин, стрижнів, трубок, кульок або дроту для металевих терморезисторів. Робочий елемент захищається вологостійким покриттям, скляним, металевим або металоскляним герметичним корпусом. Терморезистори можуть бути з прямим підігрівом (за рахунок протікаючих через них струмів) або з непрямим підігрівом (за рахунок спеціального підігрівачого елемента).

Маркування терморезисторів визначається матеріалом робочого тіла, параметрами, особливостями конструкції, наприклад:

КМТ - кобальтово-марганцевий терморезистор;

ММТ - мідно-марганцевий терморезистор;

СТ1-21 - резистор термостерований (1-кобальто-марганцеве, 3-мідно-кобальто-марганцеве; 21 - номер розробки);

ТКП - терморезистор з непрямим підігрівом;

ТКПМ - те ж, але малогабаритний; матеріалом служать оксиди титану, ванадію і заліза.

При розробці практичних схем з використанням терморезисторів враховуються не тільки залежності ВАХ, опору і інших параметрів від температури самих терморезисторів, але і подібні залежності додаткових опорів, шунтів, регульованих елементів.

## 2.5 Варістори

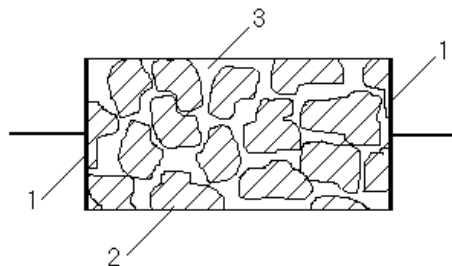
**Варістор** - це нелінійний напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги.

Залежність опору від напруги спостерігається у ряду оксидів і сульфідів металів, діборіда титану, карбиду кремнію і у багатьох матеріалів складного складу. Для виготовлення варісторів найчастіше застосовують технічний карбід кремнію (SiC – див. п. 3.9) різних аллотропічних модифікацій у вигляді порошку, змішаного із спеціальною пов'язуючою діелектричною речовиною (зв'язкою). Як зв'язку застосовують кераміку, рідке скло, кремнійорганічні лаки і інші матеріали. Карбід кремнію, зв'язаний керамікою, називають **тиритом**. Матеріал з скляною зв'язкою називають **вілітом**, а з ультрофарфорової - **летіном**.

Маркування варісторів розшифровується таким чином: СН - опір нелінійний; перша цифра позначає матеріал (1 - карбід кремнію, 2 - селен); друга цифра - тип конструкції (1 або 8 - стрижньовий, 2,6,7,10 - дисковий, 3 - мікромодульний); третя - порядковий номер розробки; далі указується класифікаційна напруга у вольтах і його допустимий розкид у відсотках.

Наприклад: СН1-1-1-820 10 %. Розшифровка: опір нелінійне з карбиду кремнію стрижньового типу першої розробки, розраховане на роботу при класифікаційній напрузі 820 В з розкидом 10 %.

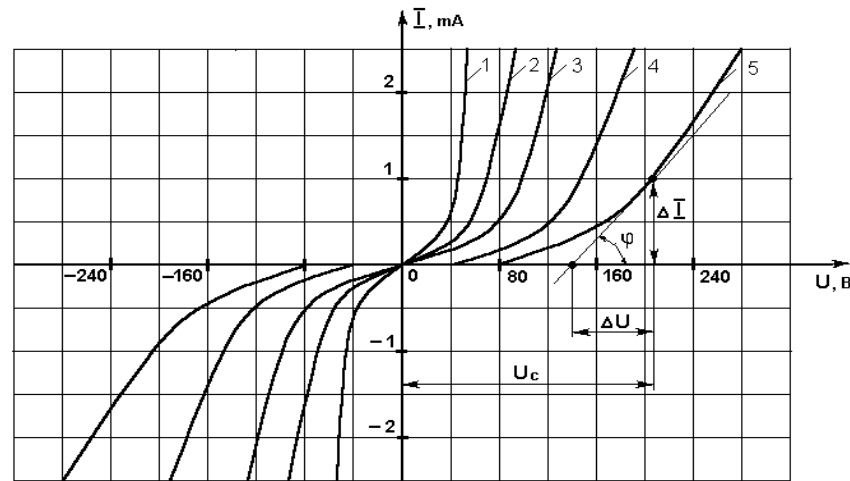
Робоча область варістора (рис. 2.4) складається з полікристалів карбиду кремнію або іншого напівпровідника, розділених діелектричною зв'язкою.



1-електроди; 2-зерна карбиду кремнію, 3-пов'язуючий матеріал

Рисунок 2.4 - Структура робочого тіла варістора

Під дією прикладеної напруги в локальних місцях зіткнення окремих зерен карбїду кремнію або в оксидних плівках на поверхні зерен розвиваються теплові ефекти або ефекти сильного поля (лавинний або тунельний пробїй). При збільшенні густини струму і виділюваної потужності можливий перехід ефектів сильного поля в теплові ефекти. Із-за нерегулярності площ і опорів контактів зерен, варистор має нелїнійну і практично симетричну ВАХ (рис. 2.5).



1 - СН1-2-1-56  $\pm$  20%; 2 - СН1-2-1-82  $\pm$  20%; 3 - СН1-2-1-120  $\pm$  10%; 4 - СН1-2-1-180  $\pm$  10%; 5 - СН1-2-1-270  $\pm$  10%

Рисунок 2.5 - Вольт - амперні характеристики варисторів.

Основне призначення варисторів - захист елементів електричних ланцюгів постійного, змінного і імпульсного струмів від перенапружень; захист контактів реле руйнування і обмоток від пробоя. Варистори застосовують також для регулювання і стабілізації різних ланцюгів і блоків РЕА, для поліпшення їх перешкодостійкості та інших важливих функцій.

### Задачі

1. У схемі виявився несправним резистор  $R = 68 \text{ Ом}$ . В розпорядженні є резистори з номіналами опорів від 100 Ом і вище й з допуском 20%. Які треба підібрати номінали опорів двох резисторів, щоб замінити несправний резистор? Як ці резистори мають бути з'єднані?

2. Для трьох послідовно з'єднаних резисторів  $R_1 = 47 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 68 \text{ Ом}$  і  $R_3 = 91 \text{ Ом}$  розрахувати розподіл напруг між ними, якщо вхідна напруга дорівнює 100 В.

3. Розрахувати кількість резисторів, що входять до касети, якщо діапазон їхніх номіналів від 1 Ом до 1 МОм включно, а допуски на відхилення від кожного номіналу а) 20%, б) 10%, в) 5%.

### 3 КОНДЕНСАТОРИ

Конденсатор — це елемент електричного кола, що складається із провідних електродів (обкладинок), розділених діелектриком.

**Функція** конденсатора – накопичувати енергію електричного поля. Ця його властивість кількісно характеризується його ємністю.

**Ємність конденсатора** - це відношення заряду конденсатора до різниці потенціалів, яка наводить заряд на обкладинки конденсатора:  $C=q/U$ , де  $C$  — ємність, Ф;  $q$  — заряд, Кл;  $U$  - різниця потенціалів на обкладинках конденсатора, В.

За одиницю ємності в Міжнародній системі одиниць вимірювань приймають фараду - ємність такого конденсатора, у якого потенціал зростає на 1 В при наведенні на його обкладинках заряду 1 Кл. Для практичних цілей фарада занадто велика, тому на практиці використовують її частки - мікрофараду (мкФ), нанофараду (нФ) і пікофараду (пФ):  $1\text{Ф} = 10^6 \text{ мкФ} = 10^9 \text{ нФ} = 10^{12} \text{ пФ}$ .

Як діелектрик у конденсаторах використовуються органічні й неорганічні матеріали, у тому числі оксидні плівки деяких металів (табл. 7.1).

Таблиця 3.1. Відносні діелектричні проникності деяких матеріалів

Матеріал	$\epsilon$	Матеріал	$\epsilon$
Повітря	1,0006	Конденсаторний папір	3,5...6,5
Кварц	2,8	Триацетат і ацетобутират	3,5...4,0
Скло	4...16	Полікарбонат	2,8...3,0
Слюда	6...8	Поліетилентерефталат	3,2...3,4
Склоемаль	10...20	Поліпропілен	2,2...2,3
Склокераміка	15...450	Полістирол	25
Кераміка	12...230	Політетрафторетилен (фторопласт)	2...2,1
Сегнетокераміка	900...80000	Оксидні плівки	10...46

При прикладенні до конденсатора постійної напруги відбувається його зарядження; при цьому витрачається певна робота, що виражається в джоулях (Дж). Вона дорівнює запасеній потенційній енергії  $W = CU^2/2$ .

Для порівняння конденсаторів використовують питомі характеристики, що є відношенням основних характеристик конденсатора до його об'єму  $V$  або маси  $m$ .



### 3.1 Класифікація конденсаторів

**За призначенням** конденсатори розділяються на дві групи: загального й спеціального призначення.

Група загального призначення містить у собі широко застосовувані конденсатори, використовувані практично в більшості видів і класів апаратури. Традиційно до неї відносять найпоширеніші низьковольтні конденсатори, до яких не ставляться особливі вимоги.

Всі інші конденсатори є спеціальними. До них належать: високовольтні, імпульсні, перешкодопридушуючі, дозиметричні, пускові й ін.

**За характером зміни ємності** розрізняють конденсатори постійної ємності, змінної ємності й підлаштувані. **Конденсатори постійної ємності** – такі конденсатори, ємність яких є фіксованою й у процесі експлуатації не регулюється. **Конденсатори змінної ємності** допускають зміну ємності в процесі функціонування апаратури. Керування ємністю може здійснюватися механічно, електричною напругою (**варіконди**) і температурою (термоконденсатори). Їх застосовують для плавного настроювання коливальних контурів, у ланцюгах автоматики й т.п. **Ємність підлаштуваних конденсаторів** змінюється при разовому або періодичному регулюванні й не змінюється в процесі функціонування апаратури. Їх використовують для підлаштування й вирівнювання початкових ємностей сполучених контурів, для періодичного підлаштування й регулювання ланцюгів схем, де потрібна незначна зміна ємності й т.п.

**За способом захисту від зовнішніх факторів** - незахищені; захищені; неізолювані; ізолювані; ущільнені; герметизовані.

**Незахищені конденсатори** допускають експлуатацію в умовах підвищеної вологості тільки в складі герметизованої апаратури. **Захищені конденсатори** допускають експлуатацію в апаратурі будь-якого конструктивного виконання. **Неізолювані конденсатори** (з покриттям або без покриття) не допускають торкання своїм корпусом шасі апаратури. Навпроти, **ізолювані конденсатори** мають досить гарне ізоляційне покриття (компаунди, пластмаси й т.п.) і допускають торкання корпусом шасі або струмоведучих частин апаратури. **Ущільнені конденсатори** мають ущільнену органічними матеріалами конструкцію корпусу. **Герметизовані конденсатори** мають герметичну конструкцію корпусу, що виключає можливість взаємодії навколишнього середовища з його внутрішнім простором. Герметизація здійснюється за допомогою керамічних і металічних корпусів або скляних колб.

**За способом монтажу** - конденсатори можуть виконуватися для друкованого й для навісного монтажу, а також для використання в складі мікромодулів і мікросхем або для з'єднання з ними. Виводи конденсаторів для навісного монтажу можуть бути тверді або м'які, аксіальні або радіальні із дроту круглого перетину або стрічки, у вигляді пелюстків, з кабельним вводом, у вигляді прохідних шпильок, опорних гвинтів і т.п. У конденсаторів для мікросхем і мікромодулів, а також НВЧ конденсаторів як виводи можуть використовуватися частини їхньої поверхні. У більшості типів оксидних, а також прохідних і опорних конденсаторів одна з обкладинок з'єднується з корпусом, що служить другим виводом.

**За видом діелектрика** конденсатори розділяють на 4 групи (табл. 3.2).

### **Конденсатори з газоподібним діелектриком**

За виконуваною функцією й характером зміни ємності ці конденсатори розділяються на постійні й змінні. Як діелектрик у них використовується повітря, стиснений газ (азот, фреон, елегаз), вакуум. Особливістю газоподібних діелектриків є мале значення тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta \leq 10^{-5}$ ) і висока стабільність електричних параметрів. Тому основною областю їхнього застосування є високовольтна й високочастотна апаратура.

**Вакуумні конденсатори** є найбільш поширеними з конденсаторів з газоподібним діелектриком в радіоелектронній апаратурі. У порівнянні з повітряними вони мають значно більші питомі ємності, менші втрати в широкому діапазоні частот, більш високу електричну міцність і стабільність параметрів при зміні навколишнього середовища. У порівнянні з газонаповненими, що вимагають періодичного підкачування газу через його витік, вакуумні конденсатори мають більш просту й легку конструкцію, менші втрати й кращу температурну стабільність; вони більш стійкі до вібрації, допускають більш високе значення реактивної потужності.

Таблиця 3.2 – Класифікація конденсаторів за видом діелектрика

Вид діелектрика	Тип конденсаторів
1. Газоподібний	Вакуумні
	Газонаповнені
	З повітряним діелектриком
2. Оксидний	Перешкодопридушуючі
	Пускові
	Імпульсні
	Високочастотні
	Неполярні

	Загального призначення
3. Неорганічний	Низьковольтні, типів; 1, 2, 3
	Високовольтні, типів; 1, 2
	Перешкодопридушуючі
	Нелінійні
4. Органічний	Низьковольтні низькочастотні
	Низьковольтні високочастотні
	Високовольтні постійної напруги
	Високовольтні імпульсні
	Дозиметричні
	Перешкодопридушуючі

Вакуумні конденсатори змінної ємності мають мале значення моменту обертання, а маса й габарити їх значно нижче в порівнянні з повітряними конденсаторами. Коефіцієнт перекриття по ємності вакуумних змінних конденсаторів може досягати 100 і більше.

Вакуумні конденсатори застосовуються в передавальних пристроях довго-, середньо- і короткохвильового діапазонів на частотах до 30...80 МГц у якості контурних, блокувальних, фільтрових і розділових конденсаторів. Вони використовуються також як накопичувачі в імпульсних штучних лініях формування й різного роду потужних високовольтних високочастотних установках.

### **Конденсатори з оксидним діелектриком**

Стара назва цих конденсаторів – електролітичні. Як діелектрик у них, використовується оксид, утворений електрохімічним шляхом на аноді — металевій обкладці з деяких металів. Залежно від матеріалу анода оксидні конденсатори підрозділяють на алюмінієві, танталові й ніобієві. Другою обкладкою конденсатора — катодом служить електроліт, що просочує прокладку з паперу або тканини в оксидно-електролітичних (рідинних) алюмінієвих і танталових конденсаторах. В танталових об'ємно-пористих конденсаторах катодом служить рідкий або гелеподібний електроліт, а в оксидно-напівпровідникових конденсаторах - напівпровідник (двоокис марганцю).

Конденсатори з оксидним діелектриком — низьковольтні, з відносно великими втратами, але на відміну від інших типів низьковольтних конденсаторів мають незрівнянно більші заряди й більші ємності (від одиниць до сотень тисяч мікрофард). Вони використовуються у фільтрах джерел

електроживлення, ланцюгах розв'язки, шунтувальних і перехідних ланцюгах напівпровідникових пристроїв на низьких частотах і т.п.

Конденсатори групи **загального призначення** мають уніполярну (однобічну) провідність, внаслідок чого їхня експлуатація можлива тільки при позитивному потенціалі на аноді. Проте, це найпоширеніші оксидні конденсатори. Вони можуть бути рідинними, об'ємно-пористими й оксидно-напівпровідниковими.

**Неполярні** конденсатори з оксидним діелектриком можуть включатися в ланцюг постійного і пульсуючого струму без врахування полярності, а також допускати зміну полярності в процесі експлуатації. Неполярні конденсатори виробляють оксидно-електролітичними (рідинними) алюмінієвими й танталовими, а також оксидно-напівпровідниковими танталовими.

**Високочастотні** конденсатори (алюмінієві рідинні й танталові оксидно-напівпровідникові) широко застосовуються в джерелах вторинного електроживлення, у якості накопичувальних і фільтруючих елементів у ланцюгах розв'язок і перехідних ланцюгів напівпровідникових пристроїв у діапазоні частот пульсуючого струму від десятків герців до сотень кілогерців. Звідси видно, що поняття «високочастотні» для оксидних конденсаторів є відносним. По частотних характеристиках їх не можна порівнювати з конденсаторами на неорганічній основі.

Для розширення можливостей використання оксидних конденсаторів у більш широкому діапазоні частот необхідно знижувати їхній повний опір. Це стало можливим при появі зовсім нових конструктивних рішень — чотирьохвыводних конструкцій і плоскої конструкції типу «книга», що дозволяють їхню експлуатацію на значно більше високих частотах.

**Імпульсні** конденсатори використовуються в електричних колах з відносно тривалим зарядом і швидким розрядом, наприклад у пристроях фотоспалахів і ін. Такі конденсатори повинні бути енергоємними, мати малий повний опір і велику робочу напругу. Щонайкраще цій вимозі задовольняють оксидно-електролітичні алюмінієві конденсатори з напругою до 500 В.

**Пускові конденсатори** використовуються в асинхронних двигунах, у яких ємність включається тільки на момент пуску двигуна. При наявності пускової ємності обертове поле двигуна при пуску наближається до кругового, а магнітний потік збільшується. Все це сприяє підвищенню пускового моменту, поліпшує характеристики двигуна. У зв'язку з тим, що пускові конденсатори включаються в мережу змінного струму, вони повинні бути неполярними й мати порівняно велику для оксидних конденсаторів робочу напругу змінного струму, яка трохи перевищує напругу промислової мережі.

На практиці використовуються пускові конденсатори ємністю порядку десятків і сотень мікрофард, створені на основі алюмінієвих оксидних плівок з рідким електролітом.

У групу оксидних **перешкодопридушуючих конденсаторів** входять тільки прохідні оксидно-напівпровідникові танталові конденсатори. Вони так само, як і прохідні конденсатори інших типів, виконують роль фільтра нижніх частот, але на відміну від них мають набагато більші значення ємностей, що дає можливість зрушувати частотну характеристику в область більше низьких частот.

**Варіконд** (від англ. variable - змінний і condenser - конденсатор) - це конденсатор, заповнений сегнетокерамікою, ємність якого різко й нелінійно залежить від прикладеної до нього напруги.

Варіконди призначені для керування параметрами електричних кіл за рахунок зміни їхньої ємності при впливі як постійної або змінної напруг, так і декількох напруг, прикладених одночасно, що різняться по величині й частоті. Варіконди є нелінійними конденсаторами.

Для виготовлення варікондів використовуються матеріали, що мають різко виражені нелінійні електричні властивості. Основними сегнетоелектричними матеріалами, використовуваними для виготовлення варікондів, є тверді розчини систем  $Ba(Ti,Sn)O_3$  або  $Pb(Ti,Zr,Sn)O_3$ .

Одна з основних характеристик варікондів - **коефіцієнт нелінійності** - відношення максимального значення діелектричної проникності при деякій, максимальній для даного матеріалу напруженості електричного поля, до початкового значення діелектричної проникності. Значення коефіцієнта нелінійності можуть змінюватися від 4 до 50 (у змінному полі). Зі збільшенням прикладеної напруги діелектрична проникність, а, отже, і електрична ємність варіконда зростають, досягають максимуму й потім знижуються.

Ступінь нелінійності і ємність варікондів сильно залежать від температури.

У найпростішому випадку варіконди працюють під впливом змінного синусоїдального поля й постійного електричного поля, причому напруженість постійного поля значно перевищує напруженість змінного поля. Чим сильніше прикладене до сегнетоелектрика постійне поле, тим менший вплив на сумарну електричну індукцію в сегнетоелектрику робить змінне поле.

Варіконди мають номінальні значення ємностей (при напрузі 5 В і частоті 50 Гц) від 10 до 100000 пФ. Варіконди характеризуються високою механічною міцністю, стійкістю до вібрацій, трясці, волозі; термін служби їх практично необмежений.

У серійному виробництві варіконди виготовляють або у вигляді одиночних дисків, або це диски, зібрані в циліндр, з номінальними значеннями ємності від 10 пФ до 0,22 мкФ. Особливості варікондів - часова й температурна нестабільність ємності, обмежений діапазон робочих частот і температур, високі значення діелектричних втрат.

Високі нелінійні властивості дозволяють використовувати варіконди для стабілізації струму й напруги, множення частоти, для автоматичного безконтактного дистанційного керування, перетворення синусоїдальної напруги в імпульсну, посилення електричної потужності й т.д.

### **Конденсатори з неорганічним діелектриком**

Конденсатори з неорганічним діелектриком можна розділити на три групи: низьковольтні, високовольтні й перешкодопридушуючі. Як діелектрик у них використовується кераміка, скло, склоемаль, склокераміка й слюда. Обкладки виконуються у вигляді тонкого шару металу, нанесеного на діелектрик шляхом безпосередньої його металізації, або у вигляді тонкої фольги.

До групи **низьковольтних конденсаторів** належать низькочастотні й високочастотні конденсатори. За призначенням вони підрозділяються на типи:

1 - конденсатори для резонансних контурів або інших ланцюгів, де мають істотне значення малі втрати і висока стабільність ємності;

2 - конденсатори для ланцюгів фільтрів, блокування й розв'язки або інших ланцюгів, де малі втрати й висока стабільність ємності не мають істотного значення;

3 - керамічні конденсатори з бар'єрним шаром, призначені для роботи в тих же ланцюгах, що й конденсатори типу 2, але мають трохи менше значення опору ізоляції й більше значення тангенса кута діелектричних втрат, що обмежує область їх застосування низькими частотами.

Звичайно конденсатори типу 1 вважаються високочастотними, а типів 2 і 3 - низькочастотними. Певної границі по частоті між конденсаторами типів 1 і 2 не існує. Високочастотні конденсатори працюють у ланцюгах із частотою до сотень мегагерц, а деякі типи використовують у гігагерцевому діапазоні.

Слюдяні й склоемалеві (скляні) конденсатори належать до конденсаторів типу 1, склокерамічні можуть бути як типу 1, так і типу 2, керамічні – усіх трьох типів.

**Висковольтні конденсатори великої й малої реактивної потужності** робляться в основному з діелектриком із кераміки й слюди. За призначенням вони можуть бути типів 1 і 2 і так само, як низьковольтні конденсатори, вони розділяються на високочастотні й низькочастотні.

Основним параметром для високовольтних низькочастотних конденсаторів є питома енергія, тому кераміки для них підбирають із великою діелектричною проникністю. Для високочастотних конденсаторів основним параметром є припустима реактивна потужність. Вона характеризує навантажувальну здатність конденсатора при наявності великих напруг високої частоти. Для збільшення реактивної потужності, вибирають кераміки з малими втратами, а конструкцію й виводи конденсаторів розраховують на можливість проходження великих струмів. Високовольтні слюдяні конденсатори роблять фольговими, тому що вони призначені для роботи при підвищених струмових навантаженнях.

**Перешкодопридушуючі конденсатори з неорганічним керамічним діелектриком** розділяються на опорні й прохідні. Їхнє основне призначення - придушення індустриальних і високочастотних перешкод, створюваних промисловими й побутовими приладами, випрямними пристроями й ін., а також перешкод атмосферних і перешкод, випромінюваних різними радіоелектронними пристроями. По суті вони є фільтрами нижніх частот. До цієї групи, виходячи з функціонального призначення й конструктивного виконання, умовно можна віднести керамічні фільтри.

**Опорні конденсатори** - це конденсатори, одним з виводів яких є опорна металева пластина з різьбовим кріпленням.

**Прохідні конденсатори** роблять коаксіальними, - один з виводів яких є струмонесучий стрижень, по якому протікає повний струм зовнішнього ланцюга, і некоаксіальними - через виводи яких протікає повний струм зовнішнього ланцюга. Прохідні керамічні конденсатори мають конструкцію трубчастого або дискового типу у вигляді багат шарових монолітних шайб.

Якщо в конденсаторах з метою підвищення резонансної частоти приймаються міри до зменшення власної індуктивності, то у фільтрах, навпаки, до ємності додають зовнішню індуктивність (феритовий сердечник) або використовують індуктивність виводів. При цьому залежно від способу з'єднання ємності й індуктивності можливі наступні схеми включення: Г-подібні, Т-подібні й П-подібні.

### **Конденсатори з органічним діелектриком**

Ці конденсатори виготовляють звичайно намотуванням тонких довгих стрічок конденсаторного паперу, плівок або їхньої комбінації з металізованими або фольговими електродами.

Розподіл конденсаторів з органічною ізоляцією на низьковольтні (до 1600 В) і високовольтні (понад 1600 В) є чисто умовним і не для всіх типів строго дотримується. Наприклад, для паперових конденсаторів границею розподілу є напруга 1000 В.

За призначенням й використовуваним діелектричним матеріалам низьковольтні конденсатори можна розділити на низькочастотні й високочастотні.

**Низькочастотними плівковими** є конденсатори на основі полярних і слабкополярних органічних плівок (паперові, метало паперові, поліетилентерефталатні, комбіновані, лакоплівкові, полікарбонатні і поліпропіленові), тангенс кута діелектричних втрат яких має різко виражену залежність від частоти. Вони здатні працювати на частотах до  $10^4 \dots 10^5$  Гц при істотному зниженні амплітуди змінної складової напруги зі збільшенням частоти.

**Високочастотним плівковими** є конденсатори на основі неполярних органічних плівок (полістирольні й фторопластові), що мають мале значення тангенса кута діелектричних втрат, що не залежить від частоти. Вони допускають роботу на частотах до  $10^5 \dots 10^7$  Гц. Верхня межа по частоті залежить від конструкції обкладок і контактного вузла та від ємності. До цієї групи відносять і деякі типи конденсаторів на основі слабкополярної поліпропіленової плівки.

**Високовольтні** конденсатори можна розділити на високовольтні постійної напруги й високовольтні імпульсні.

Як діелектрик високовольтних конденсаторів постійної напруги використовують: папір, полістирол, політетрафторетилен (фторопласт), поліетилентерефталат (лавсан) і сполучення паперу й синтетичних плівок (комбіновані).

Високовольтні імпульсні конденсатори в більшості випадків роблять на основі паперового й комбінованого діелектриків.

Основною вимогою до високовольтних конденсаторів є висока електрична міцність. Тому часто використовують комбінований діелектрик, що складається, наприклад, із шарів паперу й плівки, шарів різних органічних плівок і шару рідкого діелектрика (просочений конденсаторний папір). Комбіновані конденсатори мають підвищену в порівнянні з паперовими конденсаторами електричну міцність, надійність та більш високий опір ізоляції. Високовольтні імпульсні конденсатори поряд з високою електричною міцністю й порівняно великими ємностями повинні допускати швидкі розряди, тобто пропускати великі струми. Отже, їхня власна індуктивність повинна бути малою, щоб не спотворювати форми імпульсів. Цим вимогам найкраще задовольняють конденсатори паперові, метало паперові й комбіновані.

**Дозиметричні конденсатори** працюють у ланцюгах з низьким рівнем струмових навантажень. Тому вони повинні мати дуже малий саморозряд,



великий опір ізоляції, а отже, і велику постійну часу. Найкраще для цієї мети підходять фторопластові конденсатори.

**Перешкодопридушуючі конденсатори** призначені для ослаблення електромагнітних перешкод у широкому діапазоні частот. Вони мають малу власну індуктивність, у результаті чого підвищується резонансна частота й смуга частот, що придушуються. Крім того, для підвищення безпеки обслуговуючого персоналу, перешкодопридушуючі конденсатори повинні мати високу електричну міцність ізоляції. Перешкодопридушуючі конденсатори роблять паперовими, комбінованими й плівковими (в основному лавсановими).

### 3.2 Маркування конденсаторів

Умовна позначка конденсатора може бути скороченою і повною. Відповідно до діючої системи скорочена умовна позначка складається з букв і цифр. Перший елемент - буква або сполучення букв, що позначають підклас конденсатора:

К - постійної ємності,

КТ - підлаштовувальні,

КП - змінної ємності.

Другий елемент - позначення групи конденсатора залежно від матеріалу діелектрика відповідно до табл. 3.3

### 3.3 Основні електричні параметри й характеристики конденсаторів

**Номінальна ємність** - ємність, значення якої позначене на конденсаторі або зазначено в нормативно-технічній документації і є вихідним для відліку припустимого відхилення.

Номінальні значення ємностей стандартизовані й вибираються з певних рядів чисел. Відповідно до стандарту СЕВ 1076-78 установлені сім рядів: Е3; Е6; Е12; Е24; Е48; Е96; Е192. Цифри після букви Е вказують число номінальних значень у кожному десятковому інтервалі (декаді).

Таблиця 3.3 - Умовні позначки конденсаторів залежно від матеріалу діелектрика

Підклас	Група конденсаторів	Позначка
	Керамічні на номінальну напругу нижче 1600 В	10
	Керамічні на номінальну напругу 1600 В	15

Конденсатори постійної ємності	і вище	
	Скляні	21
	Склокерамічні	22
	Тонкоплівкові з неорганічним діелектриком	26
	Слюдяні малої потужності	3
	Слюдяні великої потужності	32
	Паперові на номінальну напругу нижче 2 кВ, фольгові	40
	Паперові на номінальну напругу вище 2 кВ, фольгові	41
	Паперові металізовані	42
	Оксидно-електролітичні алюмінієві	50
	Оксидно-електролітичні танталові, ніобієві й ін.	51
	Об'ємно-пористі	52
	Оксидно-напівпровідникові	53
	З повітряним діелектриком	60
	Вакуумні	61
	Полістирольні	71 (70)
	Фторопластові	72
	Поліетилентерефталатні	73 (74)
	Комбіновані	75
	Лакоплівкові	76
Полікарбонатні	77	
Поліпропіленові	78	
Підлаштовувальні конденсатори	Вакуумні	1
	З повітряним діелектриком	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4
Конденсатори змінної ємності	Вакуумні	1
	З повітряним діелектриком	2
	З газоподібним діелектриком	3
	З твердим діелектриком	4

Наприклад, ряд Е6 містить шість значень номінальних ємностей у кожній декаді, які відповідають числам 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 або числам,

отриманим шляхом їхнього множення на  $10^n$ , де  $n$  - ціле позитивне або негативне число.

У виробництві конденсаторів найчастіше використовуються ряди E3, E6, E12 і E24 (табл. 7.4), рідше - E48, E96 і E192. Деякі спеціальні конденсатори можуть виготовлятися на задану ємність, що вказується в документі на поставку.

Таблиця 3.4 - Найбільш уживані ряди номінальних значень ємностей:

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0		3,3	3,3	3,3
			1,1				3,6
		1,2	1,2			3,9	3,9
			1,3				4,3
	1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,6				5,1
		1,8	1,8			5,6	5,6
			2,0				6,2
2,2	2,2	2,2	2,2		6,8	6,8	6,8
			2,4				7,5
		2,7	2,7			8,2	8,2
			3,0				9,1

Фактичні значення ємностей можуть відрізнятися від номінальних у межах **припустимих відхилень**. Останні вказуються у відсотках відповідно до ряду:  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1$ ;  $\pm 2$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 20$ ;  $\pm 30$ ;  $0 \dots + 50$ ;  $-10 \dots + 30$ ;  $-10 \dots + 50$ ;  $-10 \dots + 100$ ;  $-20 \dots + 50$ ;  $-20 \dots + 80$ . Для конденсаторів з номінальними ємностями, нижче 10 пФ допускаються відхилення, що вказуються в абсолютних значеннях:  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$  і  $\pm 1$  пФ.

**Номінальна напруга** - значення напруги, що позначене на конденсаторі або зазначене в технічній документації, при якому він може працювати в заданих умовах протягом терміну служби зі збереженням параметрів у припустимих межах.

Значення номінальної напруги залежить від конструкції конденсатора й фізичних властивостей матеріалів, застосованих при його конструюванні.

Номінальна напруга встановлюється з необхідним запасом стосовно електричної міцності діелектрика, що виключає виникнення протягом гарантованого терміну служби інтенсивного старіння діелектрика, що

призводить до істотного погіршення електричних характеристик конденсатора.

Електрична міцність діелектрика залежить від виду електричної напруги (постійна, змінна, імпульсна), від температури й вологості навколишнього середовища, від площі обкладок конденсатора, зі збільшенням якої зростає число «слабких місць» діелектрика, і від часу його експлуатації. Відповідно від цих факторів залежить і значення номінальної напруги. Номінальна напруга конденсаторів багатьох типів зменшується зі зростанням температури навколишнього середовища, тому що зі збільшенням температури, як правило, прискорюються процеси старіння діелектрика.

При експлуатації конденсаторів на змінному або постійному струмі, з накладенням змінної складової напруги необхідно виконувати наступні умови:

- 1) сума постійної напруги й амплітуди змінної складової не повинна перевищувати припустимої напруги, що вказується в документі на поставку;
- 2) амплітуда змінної напруги, повинна не перевищувати значення напруги, розрахованої, виходячи із припустимої реактивної потужності.

Для конденсаторів з номінальною напругою 10 кВ і менше значення номінальних напруг встановлюються з ряду: 1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 350; 400; 450; 500; 630; 800; 1000; 1600; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000 В.

Під **номінальним струмом** конденсатора розуміють найбільший струм, при якому конденсатор може працювати в заданих умовах протягом гарантованого терміну служби. Цей параметр найбільш характерний для вакуумних конденсаторів. Він введений для правильного вибору теплових режимів конденсатора при великих значеннях електричного струму.

Значення номінального струму залежить від конструкції конденсатора, застосованих у ньому матеріалів, частоти змінної або пульсуючої напруги й температури навколишнього середовища. При проходженні через конденсатор радіоімпульсів значення імпульсного струму може значно перевищувати номінальний струм.

Значення номінального струму вакуумних конденсаторів встановлюється з ряду: 5; 7,5; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 50; 60; 75; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 400; 500; 600; 750; 1000 А.

Електричний опір конденсатора постійному струму певної напруги називається **опором ізоляції конденсатора**. Цей параметр характерний для конденсаторів з органічним і неорганічним діелектриками. Вимір опору ізоляції роблять при напругах 10, 100 і 500 В відповідно для конденсаторів з номінальною напругою до 100 В, 100...500 В и понад 500 В.

Опір ізоляції характеризує якість діелектрика і якість виготовлення конденсаторів і залежить від типу діелектрика.

Опір ізоляції для конденсаторів великої ємності зворотнопропорційний площі обкладок, тобто ємності конденсаторів. Тому для конденсаторів ємністю більше 0,33 мкФ прийнято замість опору ізоляції приводити значення постійної часу, що виражається в секундах ( $МОм \cdot мкФ$ ) і дорівнює добутку опору ізоляції на значення номінальної ємності. Опір ізоляції або постійна часу залежить від типу діелектрика, конструкції конденсатора й умов його експлуатації. При тривалому зберіганні й наробітку опір ізоляції може зменшитися на один - три порядки. Опір ізоляції конденсатора вимірюють між його выводами. Для конденсаторів, що допускають торкання своїм корпусом шасі або струмоведучих шин, вводиться поняття **опір ізоляції між корпусом і з'єднаними разом выводами**.

**Струм витоку** – це струм провідності, що проходить через конденсатор при постійній напрузі на його обкладках у сталому режимі.

Струм витоку обумовлений наявністю в діелектрику вільних носіїв заряду й характеризує якість діелектрика конденсатора. Цей параметр характерний для вакуумних і оксидних конденсаторів.

Струм витоку у великому ступені залежить від значення прикладеної напруги й часу, протягом якого воно прикладено. Струм витоку вимірюється через 1...5 хв після подачі на конденсатор номінальної напруги. При включенні конденсатора під напругу відбувається «тренування», тобто поступове зменшення струму витоку. При тривалому зберіганні й тривалій роботі струм витоку конденсаторів зростає.

**Температурний коефіцієнт ємності** – це відносна зміна ємності при зміні температури навколишнього середовища на один градус Цельсія (Кельвіна):

$$TK\epsilon = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T}. \quad (3.1)$$

ТКЄ застосовується для характеристики конденсаторів з лінійною залежністю ємності від температури, яка визначається характером температурної залежності діелектричної проникності діелектрика конденсатора, особливостями конструкції і змінами розмірів конденсаторів при нагріванні.

Ємність плаского конденсатора з електродами, що мають форму квадрата, визначають за формулою

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l^2}{h}, \quad (3.2)$$

де  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  - електрична стала, Ф/м;  $\varepsilon$  - відносна проникність;  $l$  - сторона електроду;  $h$  - товщина діелектрика.

Диференціюванням виразу (7.2) одержимо:

$$\frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{2}{l} \frac{\partial l}{\partial T} - \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial T}, \quad (3.3)$$

або 
$$TKC = TK\varepsilon + 2TKM - TKD, \quad (3.4)$$

де  $TK\varepsilon$ ,  $TKM$  і  $TKD$  - температурні коефіцієнти діелектричної проникності діелектрика, лінійного розширення металу і діелектрика, відповідно. У металізованих конденсаторах, де електрод є тонким шаром металу, нанесеним безпосередньо на твердий діелектрик, зміна розмірів електродів буде визначатися розширенням діелектрика, а не металу. В цьому випадку можна дорівняти  $TKM = TKD$ , а  $TKC = TK\varepsilon + TKD$ .

За значенням  $TKC$  керамічні й деякі інші конденсатори розділяються на групи (табл. 3.5).

Для конденсаторів з нелінійною залежністю ємності від температури, а також з великими відходами ємності від температури звичайно приводиться відносна зміна ємності в робочому інтервалі температур. Керамічні конденсатори типу 2 за припустимою зміною ємності в робочому інтервалі температур, а також слюдяні конденсатори розділяються на групи (табл. 3.6, 3.7).

### Діелектрична абсорбція конденсаторів

Явище, обумовлене вповільненими процесами поляризації в діелектрику, що призводить до появи напруги на електродах після короткочасної розрядки конденсатора, називається діелектричною абсорбцією.

Таблиця 3.5 - Групи  $TKC$  конденсаторів з лінійної або близької до неї залежністю ємності від температури

Позначення груп $TKC$	Номінальне значення $TKC$ при температурах 20...85° С, %
П100	+ 100
П120	+ 120
П33	- 133
МПО	0
МП33	- 133

МП47	- 47
М75	- 75
М150	- 150
М220	- 220
М330	- 330
М470	- 470
М700	- 700
М750	- 750
М2200	- 2200

Таблиця 3.6 - Відносна зміна ємності, що допускається в інтервалі робочих температур для керамічних конденсаторів типу 2

Позначення груп	Н10	Н20	Н30	Н50	Н70	Н90
Відносна зміна ємності, %	± 10	± 20	± 30	± 50	± 70	± 90

Таблиця 3.7 - Групи ТКЄ слюдяних конденсаторів

Позначення груп	А	Б	В	Г
Номінальне значення ТКЄ	± 200	± 100	± 50	± 20

Напруга, що з'являється на обкладках конденсатора після його короткочасної розрядки, істотно залежить від тривалості часу зарядки конденсатора, часу, протягом якого він був закорочений, і часу, що пройшов після цього. Кількісне значення абсорбції прийняте характеризувати коефіцієнтом абсорбції ( $K_a$ ), що визначається в стандартних умовах. Зразковий графік залежності напруги на конденсаторі від часу при вимірі коефіцієнта абсорбції наведений на рис 3.1.

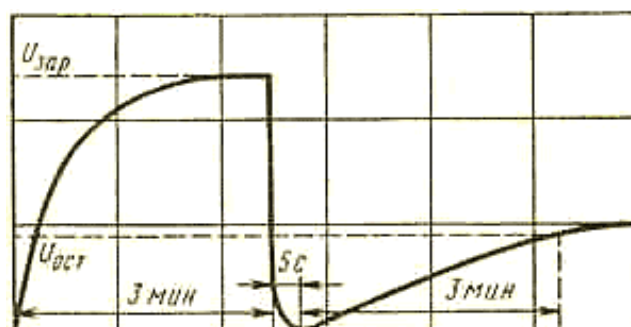


Рисунок 3.1 - Залежність напруги на конденсаторі від часу при вимірі коефіцієнта абсорбції.

Коефіцієнт абсорбції конденсаторів залежить від температури навколишнього середовища й підвищується з її зростанням.

**Задачі:**

1. При якій максимальній напрузі може працювати слюдяний конденсатор ємністю  $C = 1000$  пФ із площею обкладок  $S = 6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, якщо він повинен мати чотириразовий запас по електричній міцності. Діелектрична проникність слюди  $\varepsilon = 7$ , її електрична міцність  $E_{\text{пр}} = 100$  МВ/м. Яка товщина  $h$  слюдяної пластинки?

2. Визначити запас по електричній міцності плоского конденсатора й товщину діелектрика з неорганічного скла, якщо ємність конденсатора  $C = 68$  пФ, площа обкладки  $10$  см<sup>2</sup>, робоча напруга  $10$  кВ. Діелектрична проникність скла  $\varepsilon = 6,5$ , а його електрична міцність  $5 \cdot 10^7$  В/м.



## 4 ІНДУКТИВНІ КОМПОНЕНТИ

В електричних ланцюгах використовують три основних вида індуктивних компонентів - котушки індуктивності, дроселі і трансформатори.

Разом з конденсаторами вони використовуються для створення фільтрів, що здійснюють частотну селекцію електричних сигналів, а так само для створення елементів затримки сигналів і запам'ятовувальних елементів, здійснення зв'язку між ланцюгами через магнітний потік і т.д. На відміну від резисторів і конденсаторів вони не є стандартизованими виробами, а виготовляються для конкретних цілей і мають такі параметри, які необхідні для здійснення тих або інших перетворень електричних сигналів, струмів і напруг.

### 4.1 Котушки індуктивності

**Котушка індуктивності** — винтова, спіральна або винтоспіральна котушка зі згорнутого ізолюваного провідника, що має значну індуктивність при відносно малій ємності й малому активному опорі. Така система може накопичувати енергію магнітного поля при проходженні електричного струму.

**Функція** котушки індуктивності - чинити реактивний опір змінному струму при незначному опорі постійному струму.

Функціонування котушок індуктивності засновано на взаємодії струму й магнітного потоку. Відомо, що при зміні магнітного потоку  $\Phi$  у провіднику, що перебуває в магнітному полі, виникає електрорушійна сила (ЕРС), обумовлена швидкістю зміни магнітного потоку  $e_L = \frac{d\Phi}{dt}$ .

При підключенні до провідника джерела постійної напруги струм у ньому встановлюється не відразу, а через деякий час, тому що в момент вмикання змінюється магнітний потік і в дроті індукується ЕРС, що перешкоджає наростанню струму. Якщо ж до провідника підключене джерело змінної напруги, то струм і магнітний потік будуть змінюватися безупинно й наведена у провіднику ЕРС буде перешкоджати протіканню змінного струму, що еквівалентно збільшенню опору провідника. Чим вище частота зміни напруги, прикладеної до провідника, тим більше величина наведеної ЕРС, отже, тим більше опір, надаваний провідником струму, що протікає. Цей опір  $X_L$  не пов'язаний із втратами енергії, тому є реактивним. При зміні струму за синусоїдальним законом наведена е.р.с.

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t .$$

Вона пропорційна частоті  $\omega$ , а коефіцієнтом пропорційності - є індуктивність  $L$ . Отже, індуктивність характеризує здатність провідника чинити опір змінному струму. Величина цього опору  $X_L = \omega L$ . Індуктивність короткого провідника (мкГн) визначається його розмірами:

$$L = 2l \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \cdot 10^{-3}, \text{ де } l - \text{довжина дроту в см, } d - \text{діаметр дроту в см.}$$

Якщо дріт намотати на каркас, то утвориться котушка індуктивності. У цьому випадку магнітний потік концентрується й величина індуктивності зростає.

При протіканні струму котушка запасає енергію, що дорівнює роботі, яку необхідно витратити для встановлення струму  $I$ :  $E_{\text{запас}} = \frac{LI^2}{2}$ .

### Основні параметри котушок індуктивності

**Індуктивність** характеризує кількість енергії, що запасується котушкою, при протіканні по ній електричного струму. Чим більша індуктивність котушки, тим більше енергія магнітного поля при заданому значенні струму. Індуктивність залежить від форми, розмірів, числа витків котушки, а також від розмірів, форми і матеріалу її сердечника.

**Добротність** - відношення реактивного опору котушки до її активного опору втрат. Добротність котушки в більшості випадків визначає резонансні властивості і коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) контура.

**Втрати** складаються із втрат у дротах, діелектрику, сердечнику й екрані.

Втрати у дротах обмотки спричинені рядом факторів:

- активний опір;
- скін-ефект, тобто витиснення струму до поверхні перерізу дрота;
- ефект близькості у дротах обмотки, звитої в спіраль, тобто

витиснення струму під впливом вихрових струмів і магнітного поля до периферії дрота.

Два останніх ефекта призводять до зменшення площі перетину, через який протікає струм, а тому – до додаткового зростання опору дрота.

Втрати у діелектрику каркаса спричинені тим, що між сусідніми витками котушки існує паразитна ємність, що призводить до витоків змінного струму між витками. Втрати в сердечнику складаються з втрат на вихрові струми, на гістерезис та початкових втрат. Втрати в екрані спричинені тим, що спричинені тим, що струм, який протікає по котушці, індукує струм в металевому екрані.

**Власна ємність** (рис.4.1) є паразитним параметром.

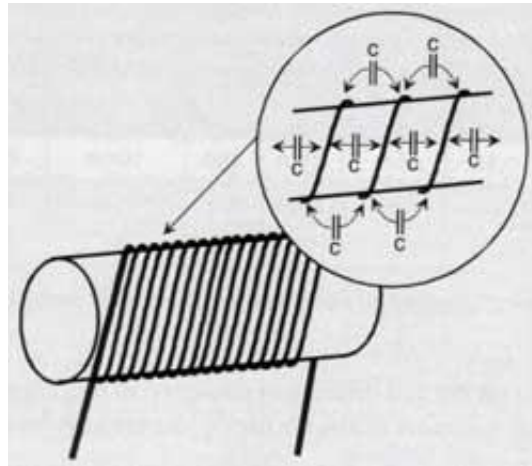


Рисунок 4.1 - Схематичне представлення паразитної ємності між витками обмотки котушки індуктивності

Наявність власної ємності котушки обумовлює окрім збільшення втрат енергії ще й зменшення стабільності настройки коливальних контурів. У діапазонних контурах власна ємність котушки зменшує коефіцієнт перекриття діапазону частот.

**Стабільність параметрів** при зміні температури і вологості, а також в часі має особливе значення для контурів гетеродинів, вузькосмугових фільтрів і ін. Стабільність індуктивності при зміні температури характеризується температурним коефіцієнтом індуктивності (ТКІ), що дорівнює відноській зміні індуктивності при зміні температури на 1 °С.

Температурна нестабільність індуктивності обумовлена рядом причин:

- при нагріванні збільшуються довжина і діаметр дроту обмотки та каркаса, що призводить до зміни кроку і діаметра витків;
- змінюється величина діелектричної проникності діелектрика каркаса, що призводить до зміни паразитної ємності котушки.

### **Класифікація котушок індуктивності**

Залежно від **призначення** високочастотні котушки індуктивності розділяють на чотири групи:

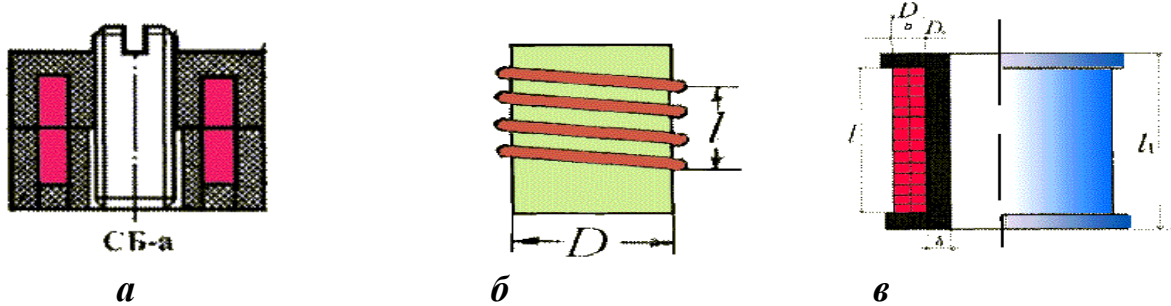
- а) котушки контурів, що не визначають частоту;
- б) котушки контурів, що визначають частоту (наприклад, гетеродинів);
- в) котушки зв'язку контурів з іншими ланцюгами;
- г) дроселі високої частоти.

**Високочастотними** називаються котушки індуктивності, опір яких має індуктивний характер в діапазоні частот з верхньою межею 100 кГц...400 МГц. Високочастотні котушки індуктивності застосовуються як елементи

коливальних контурів для отримання магнітного зв'язку між певними ділянками електричних ланцюгів радіоелектронної апаратури або створення на окремих ділянках електричного ланцюга заданих реактивних опорів індуктивного характеру.

### Конструкції котушок індуктивності

Конструкційною основою котушки індуктивності є діелектричний каркас, на який намотується дріт у вигляді спіралі (рис. 8.2).



а – з одношаровою обмоткою; б – з багат шаровою обмоткою;  
в – з багат шаровою обмоткою і сердечником

Рисунок 4.2 – Види котушок індуктивності

За конструктивними ознаками котушки ділять на циліндрові (рис. 4.3), плоскі (спіральні) і тороїдальні, одно- і багат шарові, з сердечниками і без сердечників, екрановані і неекрановані. Одношарові котушки виконуються намотуванням з примусовим кроком або суцільним. Плоскі котушки намотують з дроту або виготовляють з фольги на друкарській платі.



Рисунок 4.3 - Котушки індуктивності з повітряним сердечником і обмоткою з мідного витого семижилкового дроту (літцендрат) на пластиковому каркасі

Для намотування котушки звичайно застосовують дріт оптимального діаметра, що розраховується за допомогою емпіричних формул і графіків. При використанні для намотування котушок індуктивності жилки, що сплетена із сімох скручених дротів, порівняно з котушками, намотаними одножилковим дротом, досягається більша поверхня провідника. В результаті при високій

частоті сигналу, коли струм витискається до поверхні провідника, (скін-ефект, дивись п. 2.3), опір обмотки є меншим, ніж в обмотці з одножилкового дроту.

Ще більшу перевагу на високих частотах мають обмотки з фольги (рис.4.4).

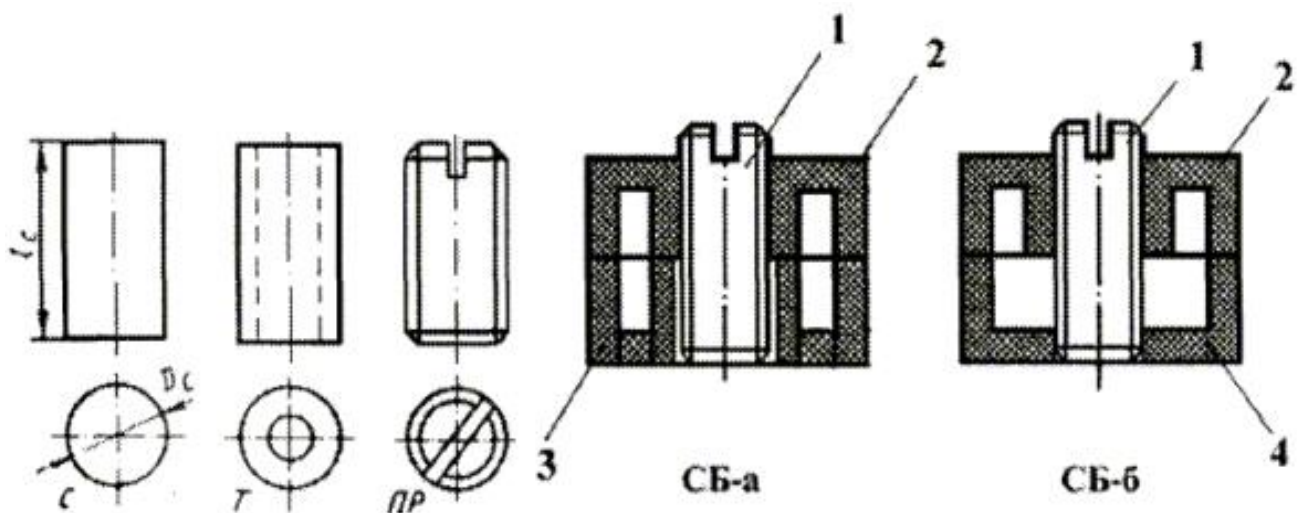


Рисунок 4.4 - Котушки індуктивності з обмоткою із фольги (розмір 74 x 27 мм<sup>2</sup>, індуктивність 1 мГн, опір 0,18000001 Ом)

Наприклад, при однакових площах перетину дроту діаметром 1,6 мм і фольги опір обмотки з фольги в високочастотному діапазоні є в 12 разів меншим. Але такі котушки є суттєво складнішими у виробництві, механічно менш міцні й менш стійкі до механічних впливів, ніж котушки, намотані сьомжилковим дротом.

Для збільшення індуктивності котушок застосовують магнітні сердечники (рис. 4.5). Розміщений усередині котушки сердечник концентрує магнітне поле і в такий спосіб збільшує її індуктивність. Переміщенням сердечника усередині каркаса можна змінити індуктивність.

Броньові сердечники складаються із двох чашок 2 (рис. 4.5), виготовлених з карбонільного заліза або феритів. Крім циліндричних і броньових сердечників застосовують тороїдальні (кільцеві) сердечники.



1 - підлаштовувальний стрижень; 2 – чашка; 3 – зімкнений магнітопровід; 4 - розімкнений магнітопровід  
 С – стрижневий; Т – трубчастий; ПР - підлаштовувальний різьбовий; СБ - броньові

Рисунок 4.5 – Різновиди сердечників котушок індуктивності

На високих частотах (десятки-сотні МГц) застосовують підлаштовувальні циліндричні сердечники з діаманетиків (латунь, мідь). При введенні цих сердечників усередину котушки її індуктивність зменшується. У котушках індуктивності, що працюють на низьких частотах, як сердечники використовують пермалої. Для зменшення втрат на вихрові струми їх складають із тонких пластин товщиною 0,002...0,1 мм.

Котушки з **сердечниками з немагнітних металів**, що характеризуються високою стабільністю, застосовуються в контурах гетеродинів, широкосмугових підсилювачів, в приймачах коротких і ультракоротких хвиль. Матеріал сердечників - мідь, латунь, алюміній і його сплави. Мідні сердечники використовуються переважно для підлаштовування індуктивності (до 20%), коли втрати, що вносяться сердечником, повинні бути мінімальними. При введенні в котушку металевого сердечника індуктивність і добротність зменшуються, причому індуктивність зменшується тим більше, чим більший об'єм металу вводиться і чим більше його провідність. Добротність зменшується ще більшою мірою, ніж індуктивність. Наприклад, введення в котушку мідного сердечника, що зменшує індуктивність на 15%, викликає зниження добротності на 45%. При введенні алюмінієвого сердечника, що зменшує індуктивність на 15%, добротність зменшується в 3...4 рази. Тому алюмінієві сердечники використовуються в котушках широкосмугових контурів для спеціальних приймачів.

Котушки з **феромагнітними сердечниками** містять меншу кількість витків при заданій індуктивності і відрізняються вищою добротністю і меншими розмірами. Застосування феромагнітних сердечників дозволяє зменшити розміри екранів і спростити підгонку індуктивності. Вказані переваги повністю реалізуються в діапазонах довгих, середніх і коротких хвиль при відповідному виборі виду сердечника і його матеріалу і малих напругах на котушці, наприклад, в радіоприймачах. При використанні феромагнітних сердечників знижується стабільність параметрів котушок, крім того, індуктивність і добротність котушок залежать від амплітуди змінної напруги на котушці і значення постійного струму, що протікає через обмотку.

Феромагнітні сердечники для котушок виготовляються з магнітодіелектриків і феритів. При заданих габаритних розмірах котушки слід застосовувати матеріал сердечника, що має найменше значення відношення тангенса кута втрат до початкової магнітної проникності в діапазоні робочих частот. Сердечники з феритів забезпечують більшу добротність котушок, ніж сердечники з магнітодіелектриків. Для стабільних високочастотних котушок індуктивності рекомендується застосовувати сердечники з карбонільного заліза.

**Основні параметри феромагнітних сердечників.** Ефективна магнітна проникність  $\mu_{\text{еф}}$  - відношення індуктивності котушки з сердечником до індуктивності цієї котушки без сердечника. Чим більша магнітна проникність матеріалу сердечника (вимірюється на сердечниках кільцевої форми), нижче частота змінної напруги на котушці і менше відстань між сердечником і обмоткою котушки, тим вище ефективна магнітна проникність сердечника.

Добротність характеризує втрати, що вносяться сердечником в котушку, і дорівнює відношенню реактивного опору котушки до опору втрат, що вносяться. Вимірюється на стандартній котушці.

Відносна добротність сердечника  $Q_{\text{відн.}}$  - відношення добротності котушки з сердечником до добротності цієї ж котушки без сердечника - характеризує втрати, що вносяться сердечником в котушку, і може служити мірою визначення діапазону робочих частот. Верхньою межею діапазону робочих частот є частота, при якій відносна добротність зменшується до одиниці. За межами діапазону робочих частот застосування сердечника доцільно тільки для регулювання індуктивності.

Стабільність параметрів сердечника характеризується зміною ефективною магнітної проникності і втрат при зміні температури навколишнього середовища, вологості повітря, а також з часом. При зміні температури змінюється головним чином магнітна проникність. Ця зміна характеризується температурним коефіцієнтом магнітної проникності  $T\mu_{\text{еф}}$ , що дорівнює відносній зміні  $\mu_{\text{еф}}$  при зміні температури на 1 °С. Зміна  $\mu_{\text{еф}}$  з часом викликається старінням матеріалу і виявляється особливо різко в початковий період після виготовлення сердечника.

Котушки з **циліндровими сердечниками**. Промисловістю випускаються циліндрові сердечники з карбонільного заліза і феритів (див. рис. 8.5). Різьбові сердечники використовуються в циліндрових одно- і багатошарових котушках, коли потрібна підгонка індуктивності в процесі регулювання апаратури, і як елемент підлаштування (підлаштування) броньових сердечників. Для тих же цілей використовуються гладкі (стрижньові) і трубчасті сердечники з напресованою різьбовою втулкою з

пластмаси. Стрижньові сердечники застосовуються також в дроселях високої частоти, а трубчасті - у фероваріометрах.

Котушки з **тороїдальними (кільцевими) сердечниками** характеризуються мінімальними розмірами, практично повною відсутністю зовнішнього магнітного поля, що дозволяє використовувати їх без екранів, і порівняно високою добротністю (при виборі відповідних матеріалів). Недоліки цих котушок складність намотування, неможливість регулювання індуктивності і знижена стабільність індуктивності. Котушки з кільцевими сердечниками застосовуються в контурах проміжної частоти малогабаритних приймачів, в контурах, що перебудовуються підмагнічуванням, як дроселі і т.п.

Вибір матеріалу і типорозміру сердечника для тороїдальних котушок визначається вимогами до котушки. При високих вимогах до стабільності параметрів котушки слід застосовувати кільця з альсиферів з компенсованим  $T\mu_n$ . Розміри кільця вибирають з урахуванням вимог до індуктивності і добротності котушки. Чим більші індуктивність і добротність котушки, тим більшими повинні бути розміри кільця.

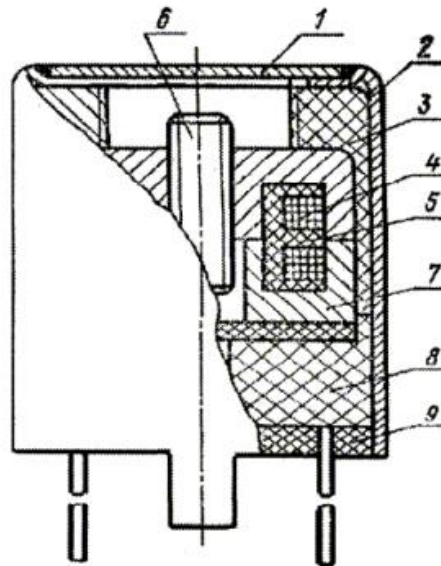
Для намотування котушок з кільцевими сердечниками слід застосовувати обмотувальні дроти з підвищеною механічною міцністю ізоляції (з додатковою, шовковою, ізоляцією або ізольованих високоміцними емаллями). Намотування виконують за допомогою шпулі, на яку заздалегідь намотують дріт. Перед намотуванням кільце слід обмотати стрічкою з лакоткани.

Для зменшення впливу електромагнітного поля котушки на інші елементи схеми, а також для зменшення впливу зовнішніх полів на котушку індуктивності, її розташовують усередині **металевого екрана** (рис.4.6).

Екрановані котушки застосовують, коли необхідно усунути паразитні зв'язки, обумовлені зовнішнім електромагнітним полем котушки, або вплив на котушку полів інших джерел. Ефективність екранування підвищується при збільшенні частоти змінного поля, товщини екрану і зменшенні питомого опору матеріалу екрану.

Екрани високочастотних котушок індуктивності виготовляють з міді або алюмінію завтовшки не менше 0,4...0,5 мм. Така товщина екрану при частоті змінного поля більше 1 МГц перевищує відстань, на якій щільність струму, що наводиться, падає в 100 разів в порівнянні з щільністю струму на поверхні екрану, що достатнє для ефективного екранування.





1 - заглушка, 2 - екран, 3 - корпус, 4 - обмотка, 5 - каркас, 6 - підлаштовуючий стрижень, 7 - чашка сердечника, 8 - підставка, 9 – заливання

Рисунок 4.6 – Екранована котушка індуктивності

Під впливом екрану змінюються параметри котушки: зменшуються індуктивність і добротність, збільшується власна місткість. Зміна параметрів котушки тим більше, чим ближче до її витків розташований екран.

Часто екрани високочастотних котушок забезпечені отворами для обертання сердечників або зміни положення однієї з котушок, зв'язаних індуктивно. У цих випадках отвору повинні бути мінімальними. Прорізи слід розташовувати перпендикулярно до створюючого циліндрового екрану, якщо котушка розташована співвісно з екраном.

#### **Котушки індуктивності для коливальних контурів**

Одношарові циліндрові котушки (див. рис. 8,2,а) виконуються на діелектричних каркасах або без них. Котушки без каркасів застосовуються, коли необхідна велика добротність при невисоких вимогах до стабільності індуктивності, наприклад для контурів входних пристроїв приймачів діапазону метрових хвиль. Діаметр дроту для таких котушок обирають в основному з міркувань жорсткості конструкції (1...1,5 мм і більше), а кількість витків обмежують (5...8). Для одношарових котушок, що виконуються суцільним намотуванням, виготовляють гладкі каркаси; для котушок, що намотуються з примусовим кроком - каркаси з канавкою, розташованою по гвинтовій лінії, або з ребрами уподовж створюючої лінії циліндра.

Котушки, намотані з примусовим кроком, відрізняються меншою власною ємністю і більшою добротністю. Підвищення їх добротності обумовлене зниженням втрат в діелектрику внаслідок зменшення власної

ємності. Вказані достоїнства котушок, намотаних з примусовим кроком, виявляються сильніше при намотуванні на каркаси з ребрами, а також при виготовленні каркаса з матеріалу з меншим значенням добутку діелектричної проникності на тангенс кута втрат.

Для одношарових котушок з індуктивністю вище 15...20 мкГ звичайно застосовують суцільне намотування. Доцільність переходу на суцільне намотування визначається діаметром катушки. Орієнтовні значення індуктивності, при яких доцільний перехід на суцільне намотування:

Діаметр каркаса, мм	0	10	15	20	25
Гранична індуктивність, мкГ	2	4	10	20	30

Катушки з індуктивністю більше сотень мікрогенрі виконують багат шаровими (див. рис. 8,2,б). При діаметрі каркаса 10 мм одношарове намотування доцільне при індуктивності не більше 30 мкГ.

Одношарові катушки індуктивності намотують мідним посрібленим дротом (з примусовим кроком) або мідним дротом в емалевій ізоляції. Катушки для коливальних контурів гетеродинів коротких і метрових хвиль, до яких ставляться вимоги високої добротності і стабільності індуктивності, намотують на каркаси з високочастотної кераміки, що характеризується малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, малим значенням тангенса кута втрат і достатньою механічною міцністю. Намотування виконують дротом із значним натягненням (50...60% розривного зусилля) або нагрітим (80...120 °С) дротом при незначному натягненні. Вищою стабільністю характеризуються катушки, в яких обмотка утворена шаром міді, нанесеної на керамічний каркас методом вжигання з подальшим срібленням.

Плоскі катушки є **спіралями**, виготовленими намотуванням з мідних обмотувальних дротів або методом друкарського монтажу з фольгованого гетинаксу або склотекстоліту. Вони можуть мати круглу, квадратну або іншу форму. Плоскі дротяні катушки характеризуються задовільною механічною міцністю, порівняно невеликою власною ємністю, простотою виготовлення і можуть застосовуватися на частотах до 10 МГц. Для їх виготовлення доцільно використовувати дроти з додатковою шовковою ізоляцією, оскільки при цьому досягається підвищена міцність клейового з'єднання витків.

Друкарські плоскі катушки на склотекстоліті відрізняються підвищеною механічною міцністю і застосовуються на частотах до 100 МГц. Для вищих частот друкарські катушки виготовляють з фольгованого фторопласту. Звичайно індуктивність друкарських котушок не перевищує 10 мкГн. Щоб набути прийнятної значення добротності катушки, ширину провідників вибирають в межах 0,4...1 мм. При цьому на площі 1 см<sup>2</sup> розміщується катушка з індуктивністю до 10 мкГн. Для збільшення індуктивності можна

використовувати послідовне включення двох і більш котушок, розташованих на одній або двох сторонах друкарської плати. Для підвищення добротності котушки слід вибрати діаметр внутрішнього витка не менше 10 мм. Сучасні друкарські котушки мають добротність 100...130 на частотах 10...30 МГц.

Індуктивність і добротність плоскої котушки істотно збільшується, якщо з однієї або обох сторін на неї накласти феритові пластинки. Змінюючи відстань між котушкою і пластинками, можна регулювати індуктивність котушки.

Індуктивно зв'язані котушки використовуються для магнітного зв'язку між коливальними контурами, між антеною (або антенним фідером) і вхідним контуром приймача, в міжкаскадних зв'язках, як ширококутні трансформатори, і т.п. Для забезпечення магнітного зв'язку між котушками їх намотують на загальний каркас (або сердечник) або розташовують поряд так, щоб їх осі були паралельні. Відхилення від цієї умови призводить до зменшення зв'язку. Ступінь магнітного зв'язку між котушками характеризується взаємною індуктивністю, яка залежить від числа витків котушок, їх форми і розмірів.

**Котушки із змінною індуктивністю**, використовуються для перебудови контурів в процесі експлуатації апаратури, а підстроювані котушки - для регулювання апаратури в процесі виготовлення.

Ступінь магнітного зв'язку між котушками характеризується взаємною індуктивністю, яка залежить від числа витків котушок, їх форми і розмірів.

Ступінь магнітного зв'язку між котушками характеризується взаємною індуктивністю, яка залежить від числа витків котушок, їх форми і розмірів.

**Фероваріометри** (варіометри з феромагнітними сердечниками) застосовуються як елементи настройки коливальних контурів, наприклад, в автомобільних приймачах.

Фероваріометр (рис. 8.7) складається з циліндрової котушки, всередину якої вводиться сердечник з високою магнітною проникністю, наприклад з фериту.

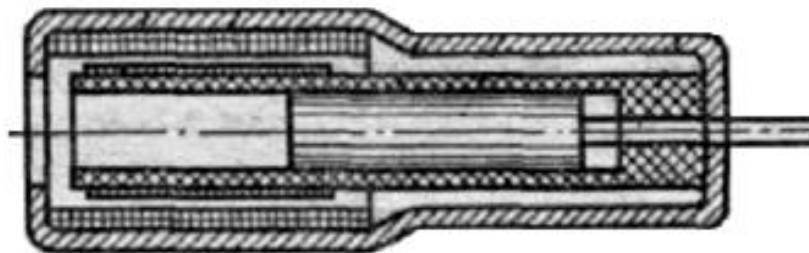


Рисунок 4.7 - Фероваріометр

Котушка розміщується усередині циліндра з феромагнітного матеріалу. Коефіцієнт перекриття фероваріометра тим більший, чим більша магнітна проникність матеріалу сердечника і чим ближче він розташований до витків котушки.

## 4.2 Дроселі

**Дросель** електричний – це котушка індуктивності, що вмикається в електричний ланцюг послідовно навантаженню для придушення або обмеження змінної складової струму. Його назва походить від німецького слова «дроселі»-«скорочувати».

Основне призначення дроселя – захист джерел живлення від попадання в них наведених високочастотних сигналів, а також уникання засорення мережі живлення електромагнітними перешкодами.

Дроселі входять до складу багатьох електротехнічних і радіоприладів (випрямлячів, радіоприймачів, радіопередавачів).

Звичайно дросель має сердечник з електротехнічної сталі (рис.8.8) або з фериту.



Рисунок 4.8 - Дроселі силові

**Дросель низької частоти** - котушка індуктивності з магнітопроводом, призначена для використання в електричних ланцюгах як індуктивний опір. Він схожий на електричний трансформатор з однією обмоткою. Обмотка дроселя, що містить багато витків ізолюваного дроту, розташовується на зібраному зі сталевих пластин сердечнику й має велику індуктивність. Такий дросель сильно протидіє усяким змінам струму, що протікає через обмотку: перешкоджає його наростанню й, навпаки, підтримує убутий струм.

На низьких частотах дроселі використовуються в фільтрах ланцюгів живлення. Він служить також для регулювання сили струму, для того щоб розділяти або обмежувати електричні сигнали різної частоти, усувати пульсації

постійного струму. У прийнятно-підсилювальній апаратурі дроселі низької частоти використовуються у фільтрах живлення, різних низькочастотних фільтрах і ланцюгах корекції амплітудно-частотної характеристики.

Основними параметрами дроселів згладжуючих фільтрів живлення є індуктивність, номінальний струм підмагнічування, опір постійному струму, допустима змінна напруги. У багатьох випадках прагнуть при заданих габаритних розмірах і масі одержати можливо велику (або задану) індуктивність при мінімальному опорі постійному струму. Оскільки індуктивність дроселя залежить від струму підмагнічування і амплітуди змінної напруги, її вимірюють при номінальному струмі підмагнічування і заданій змінній напрузі.

**Дроселем високої частоти** називають котушку індуктивності, що включається в ланцюг для збільшення опору струмам високої частоти. Їх застосовують для роботи в електричних колах, де проходять струми високої частоти. Вони мають великий опір для струмів високої частоти й пропускають струми низької частоти.

**Основні параметри дроселя:** повний опір, опір постійному струму і власна ємність. Опір дроселя постійному струму повинен бути мінімальним, повний опір - достатньо великим і мати індуктивний характер. Власна ємність  $C_0$  дроселя визначає його критичну частоту  $f_{кр}$ . На частотах нижче за критичну повний опір дроселя має індуктивний характер. Критична частота дроселя повинна бути можливо більшою (принаймні більше максимальної робочої частоти апаратури, в якій використовується дросель). Тому його власна ємність повинна бути мінімальною. Точність індуктивності не має значення.

**Конструктивно** високочастотні дроселі роблять у вигляді одношарових або багатошарових котушок, без сердечника або з магнітним сердечником.

Багатошарові використовують в діапазонах довгих і середніх хвиль, одношарові - на коротших хвилях. Для зменшення власної ємності багатошарові котушки секціонують, а одношарові намотують з примусовим кроком. Ще кращі результати можна отримати при намотуванні з прогресивним кроком, при цьому дросель повинен бути підключений так, щоб менший потенціал високої частоти був з боку малого кроку намотування.

Якщо добротність дроселя не має значення, то з метою зменшення власної ємності дроселя вибирають діаметр каркаса від 3 до 6 мм і намотують дріт малого діаметру (0,02... 0,06 мм). Проте щільність струму не повинна перевищувати 4...5 А/мм<sup>2</sup>.

Дроселі з феромагнітними сердечниками (рис. 8.9) відрізняються меншими розмірами, меншою кількістю витків при заданій індуктивності і, отже, меншою власною ємністю. Тому вони можуть працювати в ширшому

діапазоні частот. Якщо через дросель протікає невеликий струм і потрібна велика індуктивність, то доцільно використовувати тонкі стрижні (діаметром 1,5...2 мм) з феритів з великою магнітною проникністю. Якщо використовувати ферит марки 600НН, у якого зі збільшенням частоти зменшується діелектрична проникність, а при частоті вище за граничну - і магнітна проникність, то індуктивність і власна ємність дроселя зменшуватимуться з підвищенням частоти, що виключить резонансні явища в широкому діапазоні частот.



Рисунок 4.9 – Високочастотний дросель з сердечником тороїдальної форми із ферита марки 6000НН та двома секціями обмотки з індуктивністю по  $L > 1 \text{ мГн}$  кожна

### Задачі

1. Котушка індуктивності містить  $n = 200$  витків мідного ізольованого дроту, що намотаний виток до витка на поверхні діелектричного циліндра діаметром  $D = 1 \text{ см}$ . Через котушку проходить постійний струм  $I = 0,9 \text{ А}$  і змінний струм  $i = 0,1 \text{ А}$  з частотою  $f = 2 \text{ МГц}$ . Визначити: мінімальний діаметр дроту, з якого може бути виготовлена котушка, якщо припустима густина струму в обмотці  $j = 2 \text{ А/мм}^2$ ; потужність, що виділяється при цьому в обмотці; мінімальну товщину шару діелектричної лакової ізоляції, якщо електрична міцність плівки лаку  $E_{\text{пр}} = 3000 \text{ В/мм}$ . При розрахунку прийняти запас по електричній міцності лакової ізоляції  $K = 10$ .

Розв'язання

$$\text{Діаметр дроту котушки} \quad d = \sqrt{\frac{4(I+i)}{\pi j}} = \sqrt{\frac{4(0,9+0,1)}{2 \cdot 2}} = 0,8 \text{ мм}$$

Потужність, що виділяється в обмотці, визначається активним опором обмотки  $R_{\text{об}} = 4\rho_{\text{Cu}} D n / d^2 = 0,21 \text{ Ом}$  і становить  $P_{\text{об}} = (I+i)^2 R_{\text{об}} = 0,21 \text{ Вт}$ .

Індуктивність котушки

$$L = \mu_0 \mu n^2 \pi D^2 / (4l),$$

$$\text{де } l = n d - \text{довжина котушки. При } \mu = 1 \text{ одержуємо } L = \frac{\mu_0 n \pi D^2}{4d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot (10^{-2})^2}{4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 24,66 \text{ мкГн.}$$

Індуктивний опір котушки  $x = 2\pi f = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 24,66 \cdot 10^{-6} = 309 \text{ Ом} \gg R_{\text{об}}$ , товщина лакової ізоляції дроту визначається різницею потенціалів між сусідніми витками,

$$\Delta u = \frac{i x_L}{n} = \frac{0,1 \cdot 309}{200} = 0,154 \text{ В.}$$

Товщина ізолюючої лакової плівки на дроті  $h_{\text{л}} = \frac{1}{2} \frac{K \Delta u \sqrt{2}}{E_{\text{пр}}} = 0,364 \text{ мкм.}$

2. Визначити, скільки витків необхідно намотати на магнітний сердечник довжиною 100 мм і діаметром 8 мм, щоб одержати індуктивність котушки  $L = 10 \text{ мГн.}$  Магнітну проникність сердечника вважати рівною 500.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Попик Ю.В. Фізика напівпровідників : підруч. для студ. вищ. навч. закл. затв. МОНУ. Ужгород : ТОВ "ІВА", 2014., 820с., 1 прим.
2. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство : [підруч.] / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с. Савчин В.П., Шувар Р.Я. Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах : навч. посіб. рек. МОНУ. Львів : ЛНУ ім. І.Франка, 2008, 1 прим.
3. Прохоров Е.Д. Твердотіла електроніка : навч. посіб. Харків : ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2007, 1 прим.
4. Попик Т.Ю., Хархаліс Л.Ю., Попик Ю.В. Фізика напівпровідників : лабораторний практикум (навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.) Ужгород : ІВА, 2015, 1 прим.
5. Шека Д. Д. Основи магнетизму: Методичний посібник для магістрів природничих спеціальностей університету — К.: КНУ, 2012.-74 с.
6. Журавльова Л.В., Бондар В.М. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: Грамота, 2006. –312 с.
7. Електромагнітні елементи та пристрої систем управління і автоматики: навчальний посібник. Ч.1 : Електромагнітні елементи аналогових пристроїв / А. С. Васюра. – Вінниця: ВДГУ, 2000. – 146 с.
8. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : Навч. пос. Київ : Каравела, 2003, 2 прим.
9. Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М. Електроніка і мікросхемотехніка : Аналогові та імпульсні пристрої : Підручник для вnz. Харків : ФОЛІО, 2002, 7 прим.
10. Поп С.С., Шароді І.С. Фізична електроніка : Розділи: емісійні явища. Методи діагностики поверхні. Навчальний посібник. Львів : Євросвіт, 2001, 4 прим.
11. Amos Gilat, Vish Subramaniam. Numerical methods for engineers and scientists: an introduction with applications using MATLAB. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. 2014. p. 577.
12. Gilat A. MATLAB: An introduction with Applications. – John Wiley & Sons, 2004.