

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

Кафедра механізації та електрифікації с.-г. виробництва

«ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ»

Навчальний посібник для студентів ОР «Бакалавр»
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»

УДК 621.3 (075)

Украдачі:

Трегуб М. І., д. т. н., доцент,

Рубець А. М., к. т. н., доцент,

Хахула В. С. к. с.-г. н., доцент

Трегуб М. І., Рубець А. М., Хахула В. С. **Електротехнічні матеріали:** навчальний посібник, Біла Церква, 2020. - 60 с.

Іл. 15. Табл. 8. Бібліогр. 17 наймен.

Навчальний посібник містить теоретичні відомості про фізичні властивості, характеристики, призначення провідникових, діелектричних і магнітних матеріалів, що використовуються в електротехніці.

Посібник рекомендований для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Рецензенти:

Музиченко В. А., канд. техн. наук, с.н.с.

Сенчук М. М., канд. техн. наук, доцент

Схвалено методичною комісією
Білоцерківського національного
аграрного університету
Протокол № 2 від 23.09.2020 р.

© БНАУ 2020

ПЕРЕДМОВА

Сучасний рівень електротехніки та електроніки досягнутий завдяки новим електротехнічним матеріалам природнього і штучного походження які є функціональними елементами усіх електротехнічних та електронних пристроїв. Вони є електричними провідниками та напівпровідниками чи ізоляторами, а також магнітопроводами, джерелами електричного та магнітного полів. В електричних машинах і апаратах та електронних пристроях електротехнічні матеріали забезпечують розрахункові значення електропровідності, магнітопровідності, струмів, опорів, теплопровідності, ізоляційних показників та інших параметрів. Від якості виготовлення та правильного вибору електротехнічних матеріалів залежить надійність роботи електротехнічних та електронних пристроїв [1]. Аналіз пошкоджень електротехнічних виробів, що вийшли з ладу в процесі експлуатації підтверджує, що найчастішою причиною аварійності є теплове, хімічне або механічне пошкодження ізоляції одночасно з руйнівною дією електричного струму через місце пошкодження.

Напівпровідникові та магнітні матеріали протягом останніх років мали більшу динаміку покращення функціональних показників порівняно з традиційними провідниками. Особливо значне підвищення мали штучні магнітні матеріали, створені на базі рідкоземельних металів, які в десятки разів мають більшу від попередників індукцію та магнітну енергію. Загалом покращення показників магнітних матеріалів дозволяє суттєво зменшити масу і габарити електричних машин та апаратів. Досягнення силової електроніки дозволяють виготовляти електричні апарати легкі та компактні з відповідними технічними характеристиками.

Глибокi знання існуючих та перспективних електротехнічних матеріалів фахівцями електричної інженерії необхідне для проектування і технічно правильного використання сучасних електротехнічних та електронних пристроїв.

В посібнику наводяться теоретичні відомості про фізичні властивості, характеристики, призначення провідникових, діелектричних і магнітних матеріалів, що використовуються в електротехніці.

РОЗДІЛ 1. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

1.1. Призначення і класифікація провідникових матеріалів

До провідникових матеріалів відносяться метали і їх сплави [2-8]. Чисті метали мають малий питомий опір. Виключенням є ртуть, у якої питомий опір досить високий. Сплави також мають високий питомий опір. Чисті метали застосовуються при виготовленні обмотувальних і монтажних дротів, кабелів і ін. Провідникові сплави у вигляді дроту і стрічок використовуються в реостатах, потенціометрах, додаткових опорах і т. д. У підгрупі сплавів з високим питомим опором виділяють групу жаротривких провідникових матеріалів, стійких до окислення при високих температурах. Жаротривкі, або жаростійкі, провідникові сплави застосовуються в електронагрівальних приладах і реостатах. Окрім малого питомого опору, чисті метали мають гарну пластичність, тобто можуть витягуватися в тонкий дріт, в стрічки і прокатуватися у фольгу завтовшки менше 0,01 мм. Сплави металів мають меншу пластичність, але більш пружні і стійкі механічно. Характерною особливістю усіх металевих провідникових матеріалів є їх електронна електропровідність. Питомий опір усіх металевих провідників збільшується з ростом температури, а також в результаті механічної обробки, що викликає залишкову деформацію в металі [3].

Плющення або волочіння використовують у тому випадку, коли треба отримати провідникові матеріали з підвищеною механічною міцністю, наприклад при виготовленні дротів повітряних ліній, тролейних дротів і ін. Щоб повернути деформованим металевим провідникам колишню величину питомого опору, їх піддають термічній обробці, тобто відпалу без доступу кисню.

1.2. Електропровідність. Основне рівняння електропровідності

При дії на метал електричного (чи магнітного) поля (чи різниці температур) в нім виникають потоки заряджених часток і енергії. Явища виникнення цих потоків або струмів прийнято називати кінетичними ефектами або явищами перенесення, інакше - транспортними ефектами, маючи на увазі дію стаціонарних полів на нерухомі провідники. У такому разі струм або потік пропорційний різниці потенціалів (чи різниці температур), а коефіцієнт пропорційності визначається тільки геометричними розмірами провідника і фізичними властивостями самого металу. При одиничних геометричних розмірах цей коефіцієнт залежить тільки від властивостей цього металу і є його фундаментальною фізичною характеристикою, яка носить назву кінетичного коефіцієнта. При знаходженні провідника в змінному полі струми, що виникають в нім, залежать не лише від геометричних розмірів і кінетичного коефіцієнта, але і від частоти змінного поля, форми провідника, взаємного розташування елементів електричного кола. Опір провідника при змінному струмі істотно залежить від його частоти, обумовленої скін-ефектом - витіс-

ненням струму з центру провідника на периферію. З багатьох можливих кінетичних явищ найбільш відомі в техніці два: електропровідність - здатність речовини проводити постійний електричний струм під дією електричного поля, що не змінюється в часі, і теплопровідність - аналогічно по відношенню до різниці температур і теплового потоку [5].

Електропровідність властива усім матеріалам, без виключення. Заряди є присутніми у будь-яких, навіть найідеальніших діелектриках, не кажучи вже про метали і напівпровідники. Якщо ці заряди мають можливість руху, то матеріал має властивість електропровідності.

Щільність струму \vec{j} , вірна для будь-яких середовищ, визначається співвідношенням:

$$\vec{j} = \sum_{i=1}^k n_i q_i \vec{V}_i, \quad (1)$$

де i - тип, або сорт заряду (наприклад електрони, іони різних молекул, молекули і будь-які інші заряджені частки), n_i - концентрація зарядів i - сорту, q_i - значення заряду, \vec{V}_i - швидкість носіїв заряду.

Для усіх середовищ, за винятком вакууму, швидкість носіїв пропорційна напруженості поля

$$\vec{V}_i = \mu_i \vec{E} \quad (2)$$

де μ_i - рухливість носіїв заряду.

Розмірність рухливості - $m^2 / (V \cdot c)$. Фактично рухливість чисельно дорівнює швидкості носіїв заряду при напруженості поля 1 В/м. Типи носіїв заряду і їх рухливість можуть бути різними в різних середовищах.

Вираз (1) можна переписати, використовуючи інші терміни

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (3)$$

або

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho}, \quad (4)$$

де $\sigma = \sum_{i=1}^k n_i q_i \mu_i$ - питома провідність, $\rho = \frac{1}{\sigma}$ - питомий опір.

Співвідношення (3) - (4) є різні способи запису закону Ома в диференціальній формі, для локальних параметрів електричного кола. Для переходу до інтегральної форми ліву і праву частину рівняння (4) на S . А в правій частині вираз (4) помножимо чисельник і знаменник на l . Отримуємо

$$j \cdot S = \frac{E \cdot l \cdot S}{\rho \cdot l}, \quad (5)$$

або $I = U / R$ - закон Ома в інтегральній формі. При цьому так званий омичний опір визначається виразом: $R = \rho \cdot l / S$.

Співвідношення (1) - (5) визначаються природою і поведінкою носіїв заряду в різних середовищах. Очевидно, що механізми появи і зникнення зарядів залежать від будови речовин. Дослідження цих механізмів можливе на

основі аналізу, що проводиться за допомогою зонної теорії твердого тіла [2, 3] чи електронній теорії провідності [5, 6].

Обидві ці теорії дозволяють досить умовно розділити речовини провідників, діелектриків і напівпровідників залежно від значень питомого опору ρ . Зокрема у провідників – $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, у діелектриків – $\rho > 10^8$ Ом·м, у напівпровідників – $10^{-5} < \rho < 10^8$ Ом·м.

1.3. Температурний коефіцієнт питомого опору

Діапазон питомих опорів металевих провідників при нормальній температурі займає всього три порядки. Для різних металів швидкості хаотичного теплового руху електронів при певній температурі приблизно однакові. Концентрації вільних електронів розрізняються трохи, тому значення питомого опору в основному залежить від середньої довжини вільного пробігу електронів в цьому провіднику, а вона визначається структурою матеріалу провідника. Усі чисті метали з найбільш правильною кристалічною решіткою мають мінімальні значення питомого опору. Домішки, спотворюючи решітки, призводять до збільшення питомого опору. Температурний коефіцієнт питомого опору або середній температурний коефіцієнт питомого опору визначається співвідношенням [2]:

$$\alpha(\rho) = \frac{1}{\rho(d\rho/dT)} = \frac{1}{\rho(\rho_2 - \rho_1)/(T_2 - T_1)} = \frac{(T_2 - T_1)}{\rho(\rho_2 - \rho_1)}, \quad (6)$$

де ρ_1 і ρ_2 – питомі опори провідника при температурах T_1 і T_2 відповідно. При цьому $T_2 > T_1$. Температурний коефіцієнт питомого опору наводиться в довідниках і дозволяє визначити значення залежно від температури:

$$\rho = \rho_1(1 + \alpha(\rho)(T - T_1)). \quad (7)$$

Проте співвідношення (7) дає точне значення питомого опору тільки для лінійної залежності $\rho(T)$. У інших випадках цей метод є наближеним; він тим точніше, чим вузьчий інтервал температур, який використаний для визначення.

Питомий опір більшості металів, що збільшують свій об'єм при плавленні, питомий опір зростає. У металів, що зменшують свій об'єм при плавленні, питомий опір зменшується. До таких металів відносять галій, сурму і вісмут. Питомий опір сплавів завжди більший, ніж у чистих металів. Особливо це помітно, якщо при сплаві вони утворюють твердий розчин, тобто спільно кристалізуються при твердінні і атоми одного металу входять в решітки іншого. Якщо сплав двох металів створює роздільну кристалізацію і застиглий розчин - суміш кристалів кожної із складових, то питома провідність σ такого сплаву змінюється зі зміною складу майже лінійно. У твердих же розчинах ця залежність (від вмісту кожного з металів) нелінійна і має максимум, що відповідає певному співвідношенню компонентів сплаву. Іноді при пев-

ному співвідношенні між компонентами вони утворюють хімічні сполуки (інтерметаліди), при цьому вони мають не металевий характер електропровідності, а є електронними напівпровідниками.

1.4. Температурний коефіцієнт лінійного розширення

Для оцінки взаємодії зв'язаних матеріалів в різних конструкціях, а також виключення розтріскування або порушення вакуумного з'єднання матеріалів зі склом або керамікою при зміні температури, використовується температурний коефіцієнт лінійного розширення [3 - 6]. За визначенням:

$$\text{TK}_l = \alpha(l) = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}. \quad (8)$$

Тоді, використовуючи лінійне наближення, можна визначити зміну довжини провідника залежно від температури:

$$\Delta l = l \cdot \alpha(l)(T - T_1). \quad (9)$$

Крім того, він входить в розрахунок температурного коефіцієнта електричного опору дротів

$$\text{TK}_R = \alpha(R) = \alpha(\rho) - \alpha(l). \quad (10)$$

Для чистих металів зазвичай $\alpha(\rho) \ll \alpha(l)$, тому можна приблизно вважати, що $\alpha(R) \approx \alpha(\rho)$, але для деяких сплавів, що мають малі значення $\alpha(\rho)$, слід користуватися формулою (10).

1.5. Матеріали високої провідності

Серед металів високої провідності найширше застосовуються мідь і алюміній. Мідь із-за малого питомого опору (найменшого серед металів, включаючи срібло) використовують як провідниковий матеріал; крім того, вона має досить високу механічну міцність, високу корозійну стійкість і хорошу оброблюваність (прокат, волочіння, кування, а також пайка і зварювання). Виробництво міді засноване на переробці мідних руд - оксидних і сульфідних з'єднань міді, хоча мідь може зустрічатися в природі і в самородному стані. По механічній міцності розрізняють мідь тверду яку не відпалюють - МТ і м'яку мідь, що відпалюють, - ММ. За вмістом хімічних домішок мідь розділяється на марки по ГОСТ 859 - 78. Електричні характеристики міді наступні: питома провідність найбільш чистої електролітичної міді при 20° С - 59,5 МСм/м; питома провідність стандартної міді, що відпалює, при 20° С - 58 МСм/м; питомий опір стандартної міді при 20° С - 0,017241 мкОм·м; температурний коефіцієнт питомого опору при 0...150°С $\alpha(\rho) = (10 - 4,3) 1/ \text{K}$; відношення питомого опору розплавленої міді до опору твердої міді при температурі плавлення складає 2,07. При низьких температурах питомий опір міді стає дуже малим, проте надпровідності вона не має. У електротехніці мідь застосовується для виготовлення провідників, шин розподільних пристроїв, токоведущих частин приладів і електричних апаратів, анодів в галь-

ваноластиці. У електронній техніці з міді виготовляють: аноди генераторних ламп (з примусовим охолодженням); стійки антикатодів трубок рентгеновського випромінювання; траверси сіток приймально-підсилювальних ламп, усі зовнішні струмопідвідні введення; провідникову частину друкованих плат, і так далі. Мідь використовується в спаях із стеклами, хоча у неї коефіцієнт лінійного розширення більший, ніж у стекло, та зате вона має низьку межу текучості, м'якість і високий коефіцієнт теплопровідності.

Для впаювання в скло мідному електроду надається спеціальна форма у вигляді тонкого рантика (так звані рантові спаї). Для підвищення механічної міцності мідь застосовується у вигляді сплавів бронз і латуні.

При виготовленні конструкційних частин приладів і провідникових апаратів, (у тому числі для щіткотримачів і колекторних пластин) використовують наступні бронзи: олов'яні, оброблювані тиском (ГОСТ 5017 - 74); бронзи ливарні (ГОСТ 613 - 79); бронзи безоловяні ливарні (ГОСТ 493 - 79). Провідникові бронзи застосовуються для виготовлення контактів, тролейних дротів, затискачів і електродів. Латунь є мідно-цинковими сплавами і так само, як і бронзи, мають більш високу механічну міцність і підвищені значення питомого електричного опору. Латунь ділиться на оброблювані тиском і ливарні. Зазвичай вони паяються м'якими і твердими припоями і допускають електричне і газове зварювання. Марки латуні, що обробляється тиском, визначені ГОСТ 15527 - 70, а ливарних - ГОСТ 17711 - 80.

Другим за значенням питомої електричної провідності після міді при нормальній температурі є алюміній. При низьких температурах він стає таким, що навіть більше проводить, ніж мідь; це відбувається при температурі біля 70° К. Класи і марки первинного алюмінію встановлюються залежно від способу отримання і його хімічного складу. Особливо чистим є алюміній марки А999, в якому домішки складають усього 0,001%, а чистого алюмінію міститься не менше 99,999 %. Існує чотири марки хімічно чистого алюмінію, в яких кількість кожної домішки нормується, наприклад, марка А995; чистого алюмінію не менше 99,995 %; залізо 0,0015%, кремній - 0,0015 %, мідь - 0,001 %, цинк 0,001 %, титан - 0,001 %. При цьому загальна кількість домішок не повинна перевищувати 0,005%. Технічно чистого алюмінію існує вісім марок. Найбільш поширений алюміній марки АЕ, який повинен забезпечувати для виготовлення з нього і відпаленого при температурі (350 - 20)° С дроту питомий електричний опір при температурі 20° С не більше 0,028 мкОм·м. Згідно ГОСТ 4784 -74, "Сплави алюмінієві, що деформуються", є чотири марки сплавів, що є алюмінієм з нормованою кількістю домішок. Це марки АД0С, АД0, АД1 і АД, в яких алюмінію повинно бути не менше 99,7%, 99,5%, 99,3% і 98,8% відповідно.

Електричні характеристики алюмінію наступні: при 20° С питома провідність чистого алюмінію (що відпалений при 320° З впродовж 3 годин) складає 38 МСм/м; питомий опір ρ алюмінію АБ 0,028 мкОм·м; температурний коефіцієнт питомого опору при 0 ... 150° – $\alpha(\rho) \cdot 10^{-3} = 41/ \text{К}$; відношен-

ня опору розплавленого алюмінію до опору твердого алюмінію при температурі плавлення дорівнює 1,64.

При нормальній температурі, однакових перерізах і довжині електричний опір алюмінієвого дроту більший, ніж мідного, в 1,63 разу. Значить, щоб отримати алюмінієвий дріт такого ж опору, що і мідний, треба узяти його переріз в 1,63 разу більшим, тобто його діаметр має бути більший в 1,3 разів. При обмежених розмірах виробів заміна в них міді на алюміній неможлива, та зате маса двох однакових по довжині і електричному опору мідного і алюмінієвого дротів показує, що алюмінієвий, хоча і товще за мідний, але важить приблизно в 2 рази менше.

У електротехніці алюміній замінив дорогу мідь. Він використовується для виготовлення електричних дротів, кабельних, тонкоплівкових і інших струмопровідних виробів, в якості обмоток асинхронних двигунів, для виробництва сплавів, для виготовлення конденсаторів і конденсаторної фольги, для електровакуумної техніки (електроди в розрядниках, катоди в іонних рентгенівських трубках). Плющення, протягання і відпал алюмінію аналогічні цим операціям над міддю; алюміній добре вариться, але звичайними методами не паяється. На повітрі він активно окислюється, покриваючись тонкою окисною плівкою з великим електричним опором. Ця плівка, оберігаючи алюміній від подальшої корозії, створює великий перехідний опір в місцях контакту алюмінієвих деталей і робить складною їх пайку. Для пайки алюмінію зазвичай використовують ультразвукові паяльники, спеціальні припої. У місцях контакту міді з алюмінієм, особливо під впливом вологи, утворюється місцева гальванічна пара, причому полярність її така, що рух зарядів виникає від алюмінію до міді (по зовнішній поверхні), і алюміній руйнується корозією. Для захисту від корозії необхідно ретельно ізолювати місця з'єднання міді і алюмінію (покривати лаком, наприклад). Попри те, що алюміній має низьку механічну міцність, його сплави мають підвищену механічну міцність.

Сплави розділяються на алюмінієві, що деформуються (ГОСТ 4784 - 74) і алюмінієві ливарні (ГОСТ 2685 - 75). Перші призначені для виготовлення напівфабрикатів (прутків, профілів, смуг, листів, дроту, панелей, труб, штампувань і поковок) методами холодної або гарячої обробки. Другі - для виготовлення фасонних відливань.

До матеріалів високої провідності відноситься велика група металів, вживаних в електротехніці (з ними можна ознайомитися в відповідній літературі [3, 4, 6]), але по масовості застосування, вони не йдуть ні в яке порівняння з алюмінієм і міддю.

РОЗДІЛ 2. ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

2.1. Призначення і класифікація електроізоляційних матеріалів

Електроізоляційними матеріалами, або діелектриками, називають такі матеріали, за допомогою яких здійснюють ізоляцію, тобто перешкоджають витоку електричного струму між якими-небудь струмопровідними частинами, що знаходяться під різними електричними потенціалами.

При додаванні електричного поля діелектрик набуває наведений електричний момент, і в конденсаторі, наповненому діелектриком і електродами, утворюється електричний заряд:

$$Q = C \cdot U, \quad (11)$$

де Q – електричний заряд, Кл; C - електрична ємність конденсатора, Ф; U - прикладена напруга, В. Енергія електричного поля, Дж, запасена на ділянці ізоляції, визначається як $W = CU^2 / 2$. Певні рівні такої енергії високовольтних електричних апаратах можуть привести до виникнення явища, визначуваного як "пробій ізоляції", що може привести до деформації струмоведучих частин і виходу устаткування з ладу. Тому правильне визначення умов експлуатації, що перешкоджає виникненню пробою, є актуальним. Введемо деякі поняття, вживані для описів процесів в діелектриці.

Ізоляційний проміжок - пристрій, або елемент пристрою, що містить електропровідні елементи з діелектриком між ними. При підвищенні напруженості електричного поля у будь-якому діелектрику, після досягнення певного рівня виникає фізичне явище - електричний пробій проміжку.

Електричний пробій - утворення під дією високої напруги електропровідного плазмового каналу в діелектриці між електродами ізоляційного проміжку.

При цьому діелектрик перестає бути діелектриком і напруга між електродами зменшується до нуля за рахунок розряду зарядженої ємності діелектрика через електропровідний канал, що утворився. Після відключення ізоляційного проміжку з рідким або газоподібним діелектриком від джерела напруги канал розряду в рідині і в газі зникає і після деякого часу напругу можна знову подавати на пристрій. Електрична ізоляція цих матеріалів відновлюється. У твердих діелектриках канал розряду руйнує сам матеріал і не відбувається самовідновлення. Напруга на пристрої практично неможливо подати після одиничного пробою.

Діелектрики мають дуже великий електричний опір. За хімічним складом діелектрики розділяють на органічні і неорганічні. Основним елементом в молекулах усіх органічних діелектриків є вуглець. У неорганічних діелектриках вуглецю немає. Найбільшу нагрівостійкість мають неорганічні діелектрики (сльода, кераміка та ін.).

За способом отримання розрізняють природні (природні) і синтетичні діелектрики. Синтетичні діелектрики можуть бути створені із заданим комплексом електричних і фізико-хімічних властивостей, тому вони широко застосовуються в електротехніці [7, 10].

За будовою молекул діелектрики розділяють на неполярні (нейтральні) і полярні. Нейтральні діелектрики складаються з електрично нейтральних атомів і молекул, які до дії на них електричного поля не мають електричних властивостей. Нейтральними діелектриками є: поліетилен, фторопласт-4 та ін. Серед нейтральних виділяють іонні кристалічні діелектрики (слюда, кварц та ін.), в яких кожна пара іонів складає електрично нейтральну частку. Іони розташовуються у вузлах кристалічної решітки. Кожен іон знаходиться в коливальному тепловому русі біля центру рівноваги - вузла кристалічної решітки. Полярні, або дипольні, діелектрики складаються з полярних молекул-диполів. Останні внаслідок асиметрії своєї будови мають початковий електричний момент ще до дії на них сили електричного поля. До полярних діелектриків відносяться бакеліт, полівінілхлорид та ін. В порівнянні з нейтральними діелектриками полярні мають більш високі значення діелектричної проникності, а також, трохи підвищену провідність.

По агрегатному стану діелектрики бувають газоподібними, рідкими і твердими. Найбільшою є група твердих діелектриків. Електричні властивості електроізоляційних матеріалів оцінюють за допомогою величин, що називаються електричними характеристиками.

2.2. Основні характеристики електроізоляційних матеріалів

Електрична міцність діелектриків. Якщо прикласти до діелектрика напругу U і поступово її збільшувати, при деякому значенні U можливий пробій - втрата діелектриком його електроізоляційних властивостей з утворенням струмопровідного каналу. Напруга $U_{пр}$, при якому настає пробій, називається пробивною. Напруженість електричного поля $E_{пр}$, при якій стався пробій, характеризує електричну міцність діелектрика:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (11)$$

де h – найкоротша відстань по діелектрику між точками прикладення напруги. Електрична міцність для сухого повітря складає приблизно 30 кВ/см, просоченою лаком бавовняної стрічки від 40 до 50 кВ/см, електрокартону від 80 до 100 кВ/см, фарфору від 60 до 150 кВ/см, слюда від 300 до 2000 кВ/см.

Діелектрична проникність. Під час знаходження діелектрика в електричному полі молекули знаходяться в поляризованому стані. При цьому в діелектриці виникає струм зміщення. Струм зміщення з'являється при внесенні діелектрика в електричне поле і видаленні його із зони дії поля або при зміні напруженості поля.

Усі діелектрики діляться на три групи: полярні, неполярні і кристалічні [2, 5].

Полярні діелектрики складаються з молекул, які мають асиметричну будову, що призводить до неспівпадання "центрів тяжіння" позитивних і негативних зарядів в молекулі (рис. 1, а). Молекула в цьому випадку є диполем. У відсутність зовнішнього поля завдяки тепловому руху молекул, дипольні моменти орієнтовані хаотично і сумарний дипольний момент усіх молекул дорівнює нулю: $\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = 0$. До таких діелектриків відносяться фенол, нітробензол.

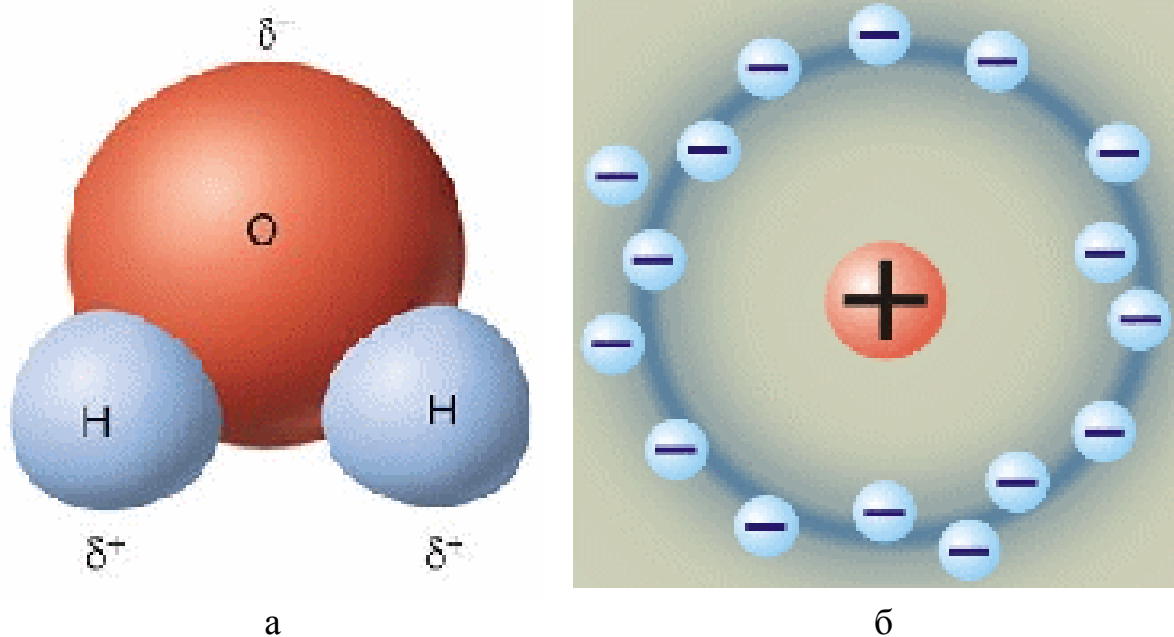


Рис.1. Будова діелектриків : а - полярного, б - неполярного

Неполярні діелектрики складаються з атомів і молекул, які мають симетричну будову (рис.1, б), тобто "центри тяжіння" позитивних і негативних зарядів співпадають у відсутність зовнішнього електричного поля і, отже, не мають власного дипольного моменту. До них відносять інертні гази, бензол, парафін, водень, кисень.

Кристалічні діелектрики мають іонну структуру. Це слабополярні діелектрики. До них відносять NaCl, KCl.

Поляризацією діелектрика називається процес орієнтації диполів, тобто зміщення позитивних і негативних зарядів усередині діелектрика в протилежні сторони.

Трьом групам діелектриків відповідає три види поляризації.

Дипольна (орієнтаційна) поляризація. За відсутності зовнішнього поля дипольні моменти полярних молекул внаслідок теплового руху орієнтовані в просторі хаотично, і їх результуючий момент дорівнює нулю (рис. 2, а). Якщо такий діелектрик помістити в зовнішнє поле (рис. 2, б), то сили цього поля будуть прагнути повернути диполі уздовж поля і виникає відмінний від нуля результуючий момент. Ця орієнтація дипольних моментів молекул

по полю тим сильніша, чим більша напруженість електричного поля і нижча температура.

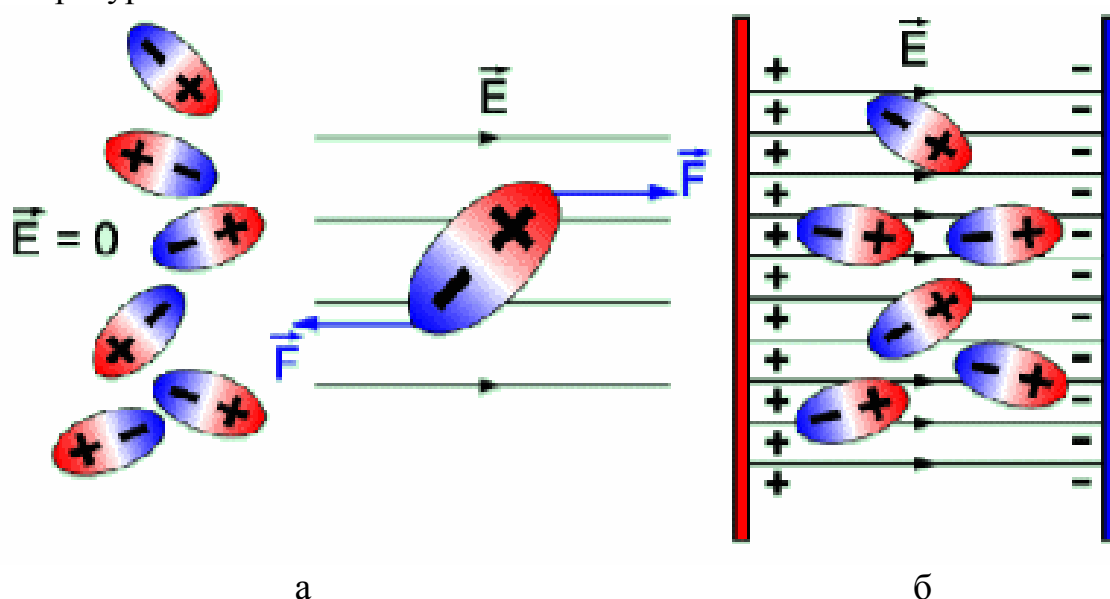


Рис.2. Дипольна поляризація

Електронна поляризація. Якщо неполярну молекулу помістити в зовнішнє електричне поле, то під дією електричного поля відбувається деформація її електронних орбіт і молекули діелектрика перетворюються на диполі, відразу орієнтовані уздовж зовнішнього поля (ядра молекули при цьому зміщуються по полю, а електронна оболонка витягується проти поля і молекула придбаває дипольний момент.

Іонна поляризація. Якщо кристалічний діелектрик (NaCl) має кристалічну решітку, у вузлах якої правильно чергуються позитивні і негативні іони, помістити в зовнішнє електричне поле, то станеться зміщення позитивних іонів решіток уздовж напрямку поля, а негативних іонів - в протилежну сторону. В результаті діелектрик поляризується (рис. 3).

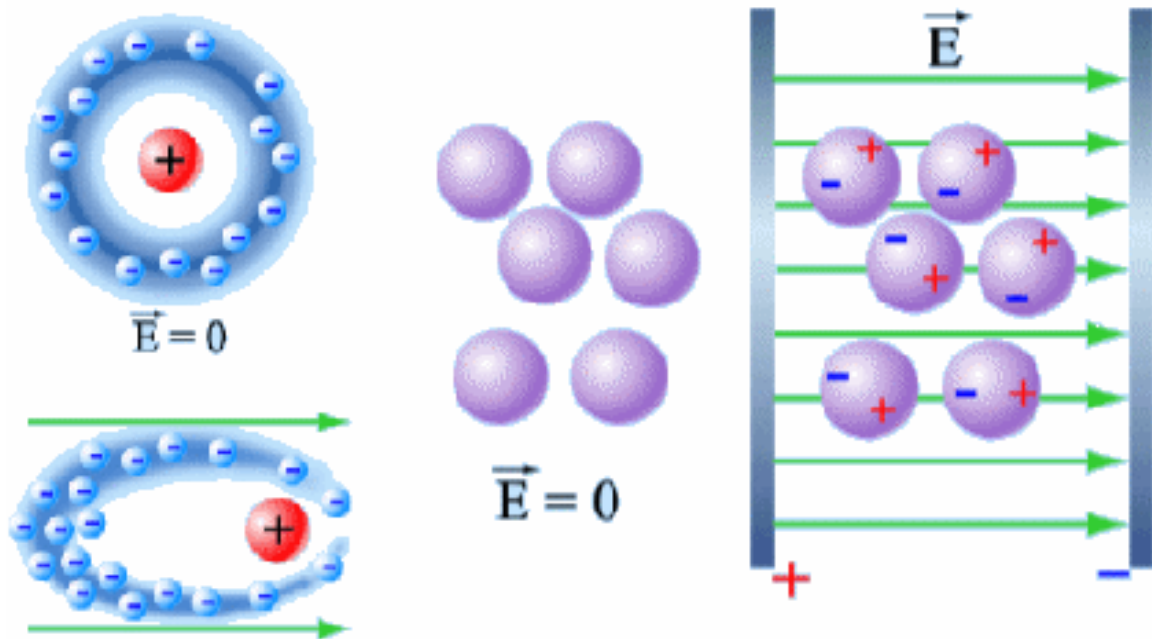


Рис. 3. Іонна поляризація

Слід виділити ще один клас діелектриків - сегнетоелектрики, речовини, для яких в певному інтервалі температур характерне явище мимовільної поляризації: сусідні диполі прагнуть орієнтуватися паралельно один одному внаслідок взаємодії між ними. Це прагнення до впорядкування передається в кристалі сегнетоелектрика від атома до атома так, що цілі макроскопічні області кристала можуть мати мимовільну поляризацію в певному напрямі. При поляризації діелектриків поляризовані молекули створюють своє власне поле, напрям якого протилежний до напрямку зовнішнього поля, тому напруженість результуючого поля зменшується. Здатність діелектрика поляризуватися визначається його діелектричною проникністю. Таким чином, діелектрична проникність характеризує міру поляризації діелектрика, а, отже, вплив поля його поляризованих молекул на результуючу напруженість поля. Абсолютна діелектрична проникність вакууму: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; її називають також електричною постійною.

Абсолютну діелектричну проникність матеріалу виражають через діелектричну проникність вакууму ϵ_0 :

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0, \quad (12)$$

ϵ – відносна діелектрична проникність матеріалу. Відносна діелектрична проникність вакууму прийнята за одиницю. Для усіх інших речовин вона більше одиниці. Наприклад, діелектрична проникність гуми більша, ніж вакууму, майже в 3 рази, фарфору - в 6 разів, слюди - в 4 - 8 разів, скла - в 7 - 8 разів, а дистильованої води - в 80 разів. Отже, відносна діелектрична проникність середовища показує, в скільки разів зменшується напруженість електричного поля в якому-небудь реальному середовищі (повітрі, фарфорі, склі) в порівнянні з вакуумом.

Діелектричні втрати - частина енергії електричного поля в діелектриці, що безповоротно перетворюється в теплоту, тобто це електрична потужність, що витрачається на нагрів діелектрика, що знаходиться в електричному полі. Втрати в діелектриках мають місце, як при постійній, так і при змінній напрузі. При постійній напрузі якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного і поверхневого опорів. При дії змінної напруги для характеристики здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі введено поняття тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$. Кутом діелектричних втрат δ називають кут, доповнюючий до 90° кут зміщення фаз φ між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі. У разі ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджає вектор напруги на кут 90° (рис. 4). При цьому кут δ дорівнює нулю. За наявності втрат, зі збільшенням розсіюваної в діелектриці потужності кут φ зменшується. При цьому з'являється (і збільшується) кут δ і його функція $\text{tg}\delta$.

Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, наприклад, для послідовної схеми заміщення діелектрика, що складається з ідеального конденсатора з місткістю C і включеного послідовно з ним резистора опором R (при вимірах на робочій частоті ω), визначаються співвідношенням (рис. 4, с):

$$\text{tg}\delta = \frac{U_A}{U_R} = \frac{R_s}{X_s}. \quad (13)$$

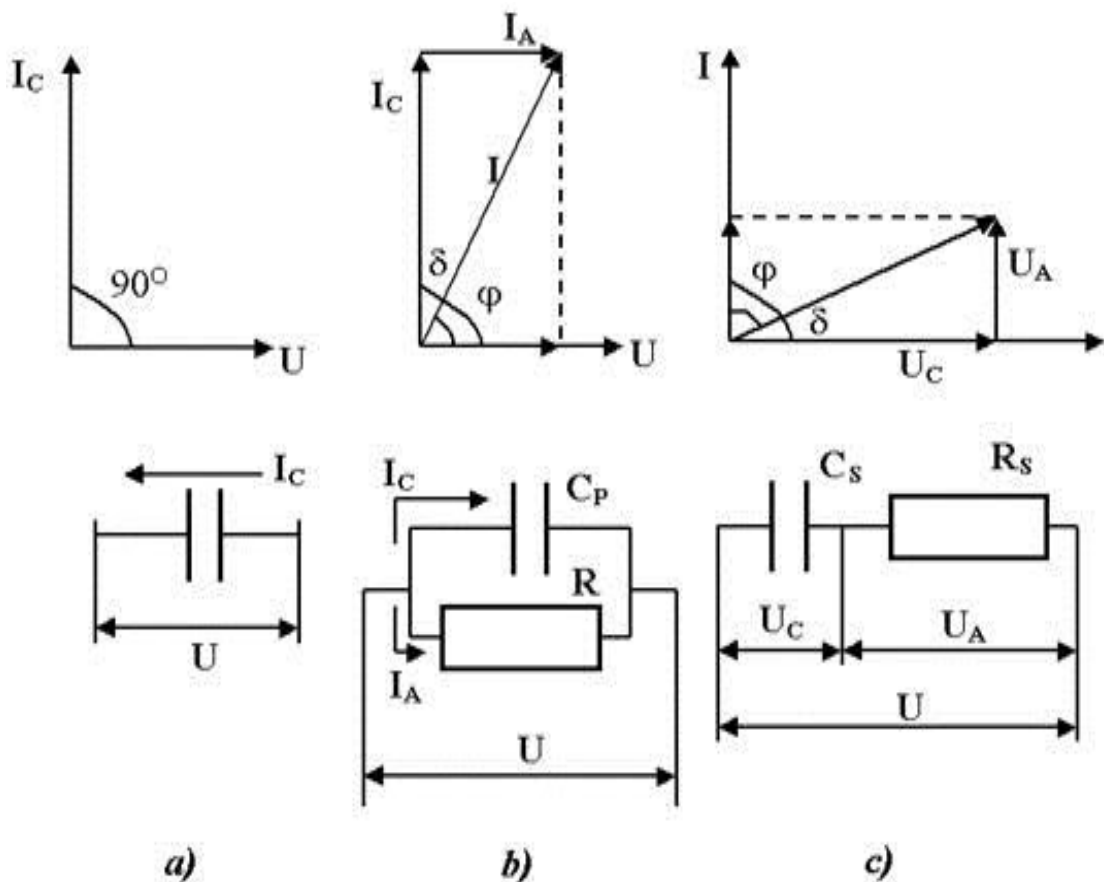


Рис. 4. Схеми заміщення і векторні діаграми для діелектриків:

а) ідеального; б) реального (паралельна схема заміщення); с) реального (послідовна схема заміщення)

У матеріалів, вживаних у високочастотному діапазоні і при високій напрузі, $\text{tg}\delta$ лежить у межах $10^{-3} - 10^{-4}$; для низькочастотних діелектричних матеріалів, полярних діелектриків, значення $\text{tg}\delta$ зазвичай $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$, для слабополярних – до 10^{-3} ; для добре осушених газів, що не містять вологи, значення можуть досягати $10^{-5} - 10^{-8}$. Іноді вводиться поняття добротності ізоляції – Q , величини, обернено пропорційної до тангенса кута діелектричних втрат.

По своєму призначенню електроізоляційні матеріали під впливом постійної напруги абсолютно не повинні пропускати електричний струм, тобто мають бути непровідними. Іншими словами, питомий опір електроізоляційних матеріалів в ідеальному випадку має бути нескінченний великим. Проте усі практично вживані електроізоляційні матеріали при прикладанні постійної напруги пропускають деякий, зазвичай дуже незначний струм, що називається струмом витоку. Тому, чим більше питомий опір електроізоляційного матеріалу, тим вище його якість як ізолятора, оскільки більше незначним буде струм витоку [1, 5, 10].

Струм витоку, що протікає через ділянку ізоляції при процесі електропровідності, що встановився, тобто через досить великий проміжок часу після прикладання до цієї ділянки постійної напруги, також є постійним і називається наскрізним струмом $I_{\text{нас}}$ (рис. 5). До моменту встановлення рівноважного стану в діелектриці протікають процеси зміщення пов'язаних зарядів, створюючи поляризаційні струми, або струми зміщення $I_{\text{зм}}$. Струми зміщення пружнозв'язаних зарядів при електронній і іонній поляризаціях такі короткочасні, що їх зазвичай не вдається зафіксувати. Струми зміщення різних видів уповільненої поляризації називають струмами абсорбції $I_{\text{абс}}$. При постійній напрузі струми абсорбції протікають тільки у момент включення і виключення напруги, при змінній напрузі - впродовж усього часу знаходження матеріалу в електричному полі.

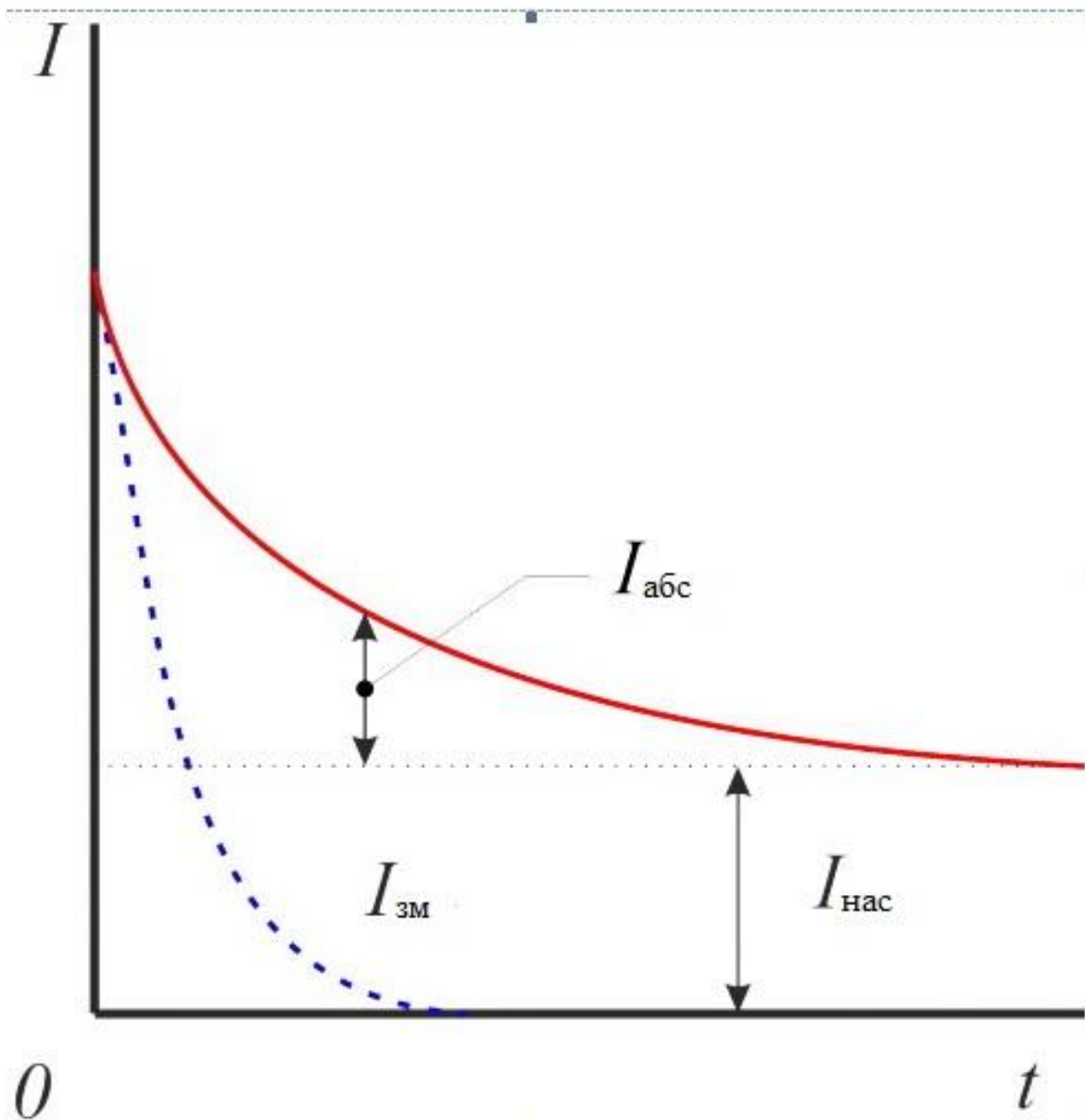


Рис. 5. Залежність струму через діелектрик від часу

При роботі діелектрика під постійною напругою повні втрати потужності визначаються співвідношенням:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_{\text{из}}}, \quad (14)$$

де I – струм витoku, $R_{\text{из}}$ – опір ізоляції.

Під впливом електричного поля, що змінюється з кутовою частотою ω , потужність втрат має вигляд як для діелектрика ємністю C :

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta. \quad (15)$$

Цей тип втрат відносять до втрат на електропровідність.

Інші типи втрат в діелектриці:

релаксаційні втрати обумовлені активними складовими поляризаційних струмів. Характерні для діелектриків, що мають уповільнені види поляризації, і проявляються в області досить високих частот;

іонізаційні втрати властиві діелектрикам в газоподібному стані;
резонансні втрати спостерігаються в деяких газах при певній частоті і виражаються в інтенсивному поглинанні енергії електромагнітного поля; можливі і в твердих тілах, якщо частота вимушених коливань, що викликається електричним полем, співпадає з частотою власних коливань часток твердої речовини.

2.3. Газоподібні і рідкі діелектрики

2.3.1. Характеристики газоподібних діелектриків

Основні характеристики газів, як діелектриків, це - діелектрична проникність, електропровідність, електрична міцність. Крім того, часто важливі теплофізичні характеристики, в першу чергу теплопровідність.

Діелектрична проникність газів визначається співвідношенням:

$$\epsilon = n(\alpha + \mu^{2/3} kT) / \epsilon_0, \quad (16)$$

де n – число молекул з поляризованістю α і дипольним моментом μ у одиниці об'єму, $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (постійна Больцмана), T – абсолютна температура [5]. Наприклад, при кімнатній температурі $kT \approx 1/40$ еВ. Звичайне значення ϵ близько до 1, відмінність від одиниці можна виявити в 3-4 знаку після коми. Причина цього - мале число молекул в газовій фазі n .

Електропровідність газів зазвичай не гірша 10^{-13} См/м, причому, основним чинником що викликає провідність в не дуже сильних полях, є іонізуюче випромінювання. Вольт-амперна характеристика має три характерні зони - омічна поведінка, насичення, експоненціальний ріст (рис. 6). Діелектричні втрати незначні і їх варто враховувати тільки в третій області.

Електрична міцність у газів, порівняно з міцністю рідин і твердих діелектриків, невелика і дуже залежить як від зовнішніх умов, так і від природи газу. Зазвичай пробивні характеристики різних газів порівнюють за нормальних умов (н.у.). Ці умови - тиск 1 атм, температура 20° С, електроди, що створюють однорідне поле, площею 1, міжелектродний проміжок 1 см повітря при н.у. має електричну міцність 30 кВ/см. Значення коефіцієнта k , що показує відношення електричної міцності газу до електричної міцності повітря деяких газів, використовуваних в техніці приведені в таблиці 1:

Таблиця 1
Відношення електричної міцності газу до електричної міцності повітря

Газ	Коефіцієнт k
водень	0,5
гелій	0,2
елегаз (SF ₆)	2,9
фреон-12	2,4

перфторовані вуглеводневі гази	4-10
-----------------------------------	------

Теплопровідність газів також невелика в порівнянні з теплопровідністю твердих тіл і рідин, найбільше її значення ($\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) у водню. Для найбільш популярних газів: $\lambda = 0,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ має повітря, $\lambda = 0,012 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ – елегаз. Для порівняння у алюмінію $\lambda = 200 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Максимальні температури експлуатації газів визначаються або розкладанням молекул газу (характерно для складних молекул), або збільшенням електропровідності до переходу з діелектричного до резистивного стану за рахунок іонізації і дисоціації молекул газу під дією теплової енергії.

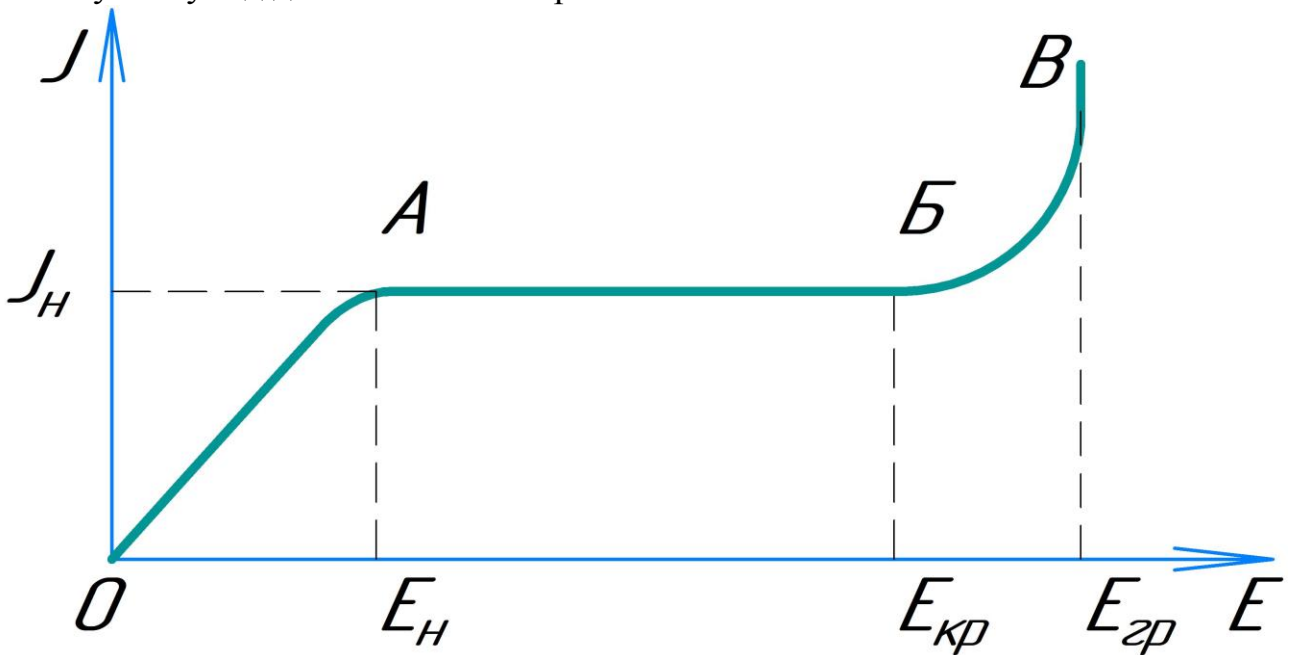


Рис. 6. Залежність щільності струму j від напруженості електричного поля у газах: OA - ділянка підпорядкування закону Ома; AB - ділянка насичення, BB - область самостійної провідності

2.3.2. Пробій газоподібних діелектриків

Розглянемо механізм пробою газоподібних діелектриків на прикладі повітря. В результаті дії зовнішнього іонізуючого випромінювання повітря завжди містить деяку кількість вільних електронів і іонів, які, так само як і нейтральні молекули, знаходяться в тепловому русі. При прикладанні зовнішнього електричного поля ці заряджені частки додатково набувають спрямований рух - дрейф. Важлива роль при цьому належить електронам як часткам, що мають більшу рухливість, ніж іони. Вільний електрон (зазвичай це n вільних електронів) під дією прикладеного електричного поля, рухаючись у напрямку до анода, набувають додаткову енергію W , рівну для однорідного поля

$$W = e \cdot \lambda \cdot E, \quad (17)$$

де e – заряд електрона; λ – довжина вільного пробігу (ділянка шляху, пройдена електроном між зіткненнями з іншими зарядженими частками; E – напруженість електричного поля. Якщо ця енергія досягає величини $W_{и}$, необхідної для іонізації нейтральної молекули газу ($W > W_{и}$), то можливий пробій. Енергію іонізації $W_{и}$ зазвичай характеризують іонізаційним потенціалом:

$$U_{и} = W_{и}/q. \quad (18)$$

Іонізаційний потенціал різних газів лежить в межах від 4 до 25 В, що відповідає енергії іонізації від 4 до 25 еВ. Основну іонізацію ведуть електрони, оскільки іони занадто важкі, щоб набрати необхідну швидкість. В результаті при зіткненні з атомами і молекулами електрони породжують нові електрони. Звільнені при цьому "вторинні" електрони під дією поля, у свою чергу, викликають іонізацію молекул газу. В результаті цього процесу число електронів в газовому проміжку дуже швидко ("лавинноподібно") збільшується. Ударна іонізація електронами складає основу пробою газу. Проте електронна лавина сама по собі ще не достатня для утворення пробою, оскільки не створює провідникового шляху, між електродами. Отже, окрім ударної іонізації електронами, повинні мати місце і інші явища, що значно впливають на процес формування розряду. Характер явищ, супроводжуваних ударною іонізацією електронами, визначає механізм пробою газів.

Відомо два механізми пробою газів: лавинний і лавинно-стримерний. При лавинному механізмі ударна іонізація електронами супроводжується вторинними процесами на катоді, в результаті яких заряди в газовому проміжку заповнюються. В цьому випадку для пробою газу потрібно утворення серії лавини. Кожна лавина, що знову утворюється, в порівнянні з попередньою, повинна містити більше число електронів - відбувається "розгойдування" електронної лавини (рис. 7). Лавинний пробій, як правило, розвивається впродовж відносно тривалого часу (більше 1 мкс) і не характерний для імпульсної напруги. При лавинно-стримерному механізмі на розвиток пробою істотно впливає спільна дія поля просторового заряду лавини і фотоіонізація в об'ємі газу. Завдяки цим вторинним процесам електронна лавина створює підвищену концентрацію носіїв заряду, яка достатня для безпосереднього перетворення її в стример. Стример є скупченням іонізованих часток, що сильно перевершує лавину по мірі іонізації. Після поширення стримерів (негативного і позитивного) на увесь міжелектродний проміжок відбувається пробою газу. Лавинно-стримерний пробій полягає в наступному. У ряді випадків електрон, розігнаний полем, може не іонізувати молекулу, а привести її в "збуджений стан" - викликати зміну в русі електронів, пов'язаних з молекулою. У наступний момент ця "збуджена" молекула віддає свою надмірну енергію у формі випромінювання - випускає фотон. Фотон поглинається якою-небудь іншою молекулою, яка при цьому може іонізуватися. Така внутрішня фотонна іонізація газу, завдяки великій швидкості поширення випромінювання, призводить до особливо швидкого розвитку в розрядному проміжку каналів

підвищеної електропровідності газу. Основна і дочірня лавина, рухаючись до анода, росте, наздоганяє один одного, зливається і утворює електронегативний стример - ланцюжок електронної лавини, що злилася в єдине ціле. Також утворюється потік з позитивних іонів, який рухається у зворотному напрямі, утворюючи електропозитивний стример. Підходячи до катода, позитивні іони, ударяючись об його поверхню, утворюють катодну пляму, що світиться, випромінюючи "вторинні" електрони. Позитивний стример, заповнюючись вторинними електронами і електронами, що утворюються в результаті електронної ударної іонізації і фотоіонізації, перетворюється на наскрізний канал газорозрядної плазми. Електропровідність цього каналу дуже висока, і по ньому спрямовується струм короткого замикання $I_{кз}$.

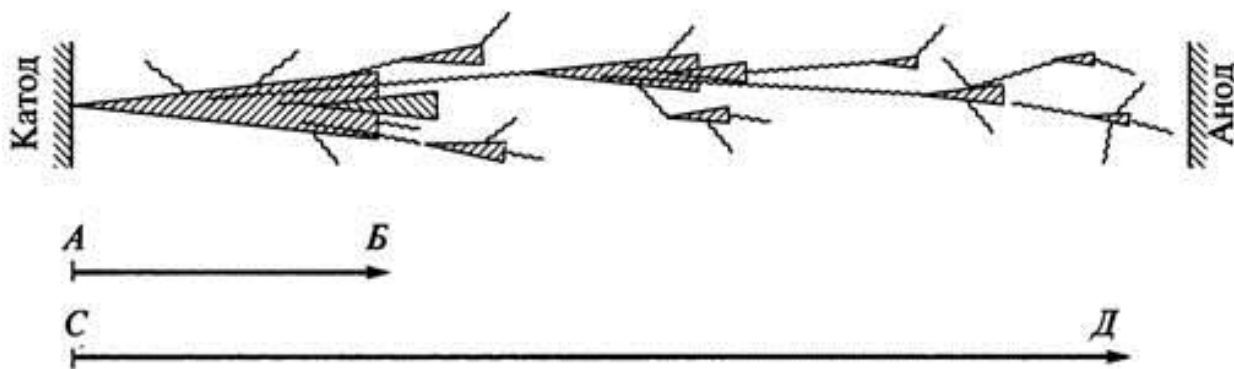


Рис. 7. Зображення електронної лавини (АБ) і утворення електронного стримера (СД) при пробі газу

Утворення плазмового газорозрядного каналу (рис. 6) фактично і є пробом газів. Виникнення $I_{кз}$ – наслідок пробом. Залежно від величини $I_{кз}$ пробій проявляється у вигляді іскри або електричної дуги.

Явище пробом газу залежать від міри однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Електричні поля прийнято розділяти на однорідні і неоднорідні. Однорідним електричним полем називається поле, в різних точках якого напруженість має однакові значення. Наприклад, однорідним є поле в середній частині плоского конденсатора. У такому полі пробій настає практично миттєво досягнувши суворо певної напруги, залежної від температури і тиску газу. Однорідним полям відповідає найбільша електрична міцність газів. У неоднорідному полі напруженість в різних точках має неоднакові значення. У електричних установках більшість полів є різко неоднорідними. У таких полях напруженість між електродами в різних точках відрізняється більш ніж в три рази. Прикладом різко неоднорідних полів можуть служити поля між електродами "вістря - вістря" і "вістря - площина" (що є аналогами реальних систем електродів "дріт - дріт" і "дріт - земля" на повітряних лініях електропередачі).

У неоднорідних полях електрична міцність газів завжди нижча, ніж в однорідних. Це пояснюється тим, що в неоднорідних полях є місця з підви-

щеною напруженістю, де і починається ударна іонізація при порівняно невеликій напрузі на електродах. Чим менші розміри електроду, тим більше біля нього напруженість електричного поля. При несиметричних електродах і постійній напрузі пробивна напруга залежить і від полярності електродів. Оскільки поблизу вістря напруженість поля найбільша, там починається процес ударної іонізації, в результаті якого утворюються заряджені частки - електрони і іони. Електрони є рухливішими частками, тому швидко йдуть із зони іонізації і віддають свій заряд позитивному аноду. В результаті в зоні іонізації, яка обмежена невеликою областю у вістря, утворюється надлишок позитивних іонів (позитивний об'ємний заряд). У разі позитивного вістря позитивний об'ємний заряд є як би продовженням вістря і збільшує напруженість на ділянці, що сприяє розвитку іонізації на цій ділянці. При негативному вістрі позитивний об'ємний заряд екранує вістря і тим самим зменшує напруженість на ділянці, що ускладнює процеси іонізації праворуч від об'ємного заряду.

У міру подовження проміжку, для довгих проміжків, можливе виникнення повторних стримерів в сліді першого стримера. Це відбувається тому, що там, де пройшов стример, газ прогрівается, щільність газу зменшується, його електрична міцність зменшується, і в сліді стримера можуть виникати і поширюватися нові стримери зі своїм додатковим нагрівом і так далі. В результаті локального підвищення температури в нім починається термоіонізація, і зростає електропровідність, за значенням вище за перехід з діелектричного стану в провідниковий стан. Виникаюча структура - лідер еквівалентна просуванню електроду у вигляді вістря углиб проміжку, що сприяє пробою довгих проміжків. У лініях електропередач реалізується саме цей вид пробою. Крім того, для ліній електропередач і інших систем з різко неоднорідним полем виникає особливе явище розряду - корона. Це іонізаційні процеси в локальній області поблизу електроду. Електричне поле так швидко зменшується при віддаленні від дроту, що просування каналу розряду припиняється на деякому віддаленні від електроду і міжелектродний проміжок не перетинається. Коронні розряди призводять до втрат енергії, вносять шуми в радіочастотному діапазоні, виділяють озон і шкідливі оксиди азоту.

Пробивна напруга газу в однорідному полі залежить від тиску p і відстані h між електродами. Ця залежність, що називається законом Пашена, зображена на рис 8.

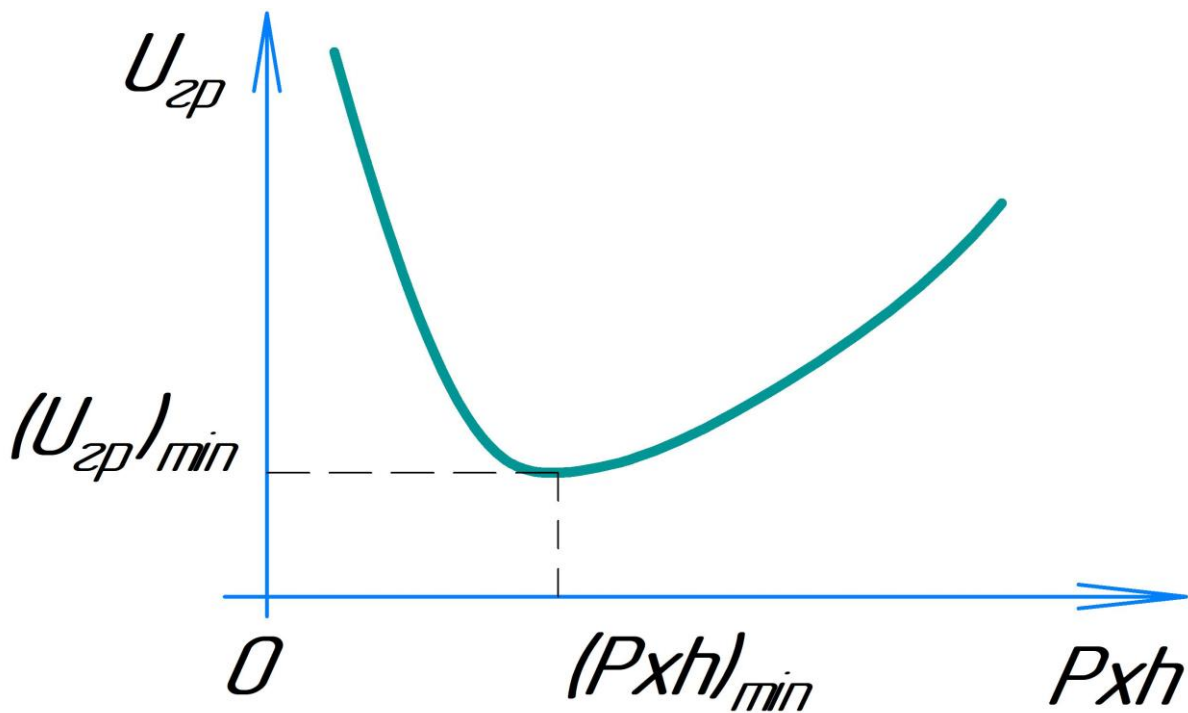


Рис. 8. Крива Пашена

2.3.3. Застосування газоподібних діелектриків

Найбільше застосування з газів в енергетиці має повітря. Це пов'язано з дешевизною, загальнодоступністю повітря, простотою створення, обслуговування і ремонту повітряних електроізоляційних систем, можливістю візуального контролю. Об'єкти, в яких застосовується повітря в якості електричної ізоляції, - лінії електропередач, відкриті розподільні пристрої, повітряні вимикачі і тому подібне

На основі елегазової ізоляції створені і активно експлуатуються кабелі, конденсатори, вимикачі, компактні ЗРП (закриті розподільні пристрої). Елегаз (шестифториста сірка) має хімічну інертність, нетоксичність, негорючість, термостійкість (до 800°C), вибухобезпечність, слабка розкладанням в розрядах, низьку температурою зріджування. За відсутності домішок елегаз абсолютно нешкідливий для людини. Проте продукти розкладання елегаза в результаті дії розрядів (наприклад, в розряднику або вимикачі) токсичні і хімічно активні [2, 6, 8].

Приведемо основні характеристики елегаза. Електрична міцність при атмосферному тиску і проміжку 1 см складає 89 кВ/см. Молекулярна маса складає 146, характерним є дуже великий коефіцієнт теплового розширення і висока щільність. Це важливо для енергетичних установок, в яких проводиться охолодження яких-небудь частин пристрою, оскільки при великому коефіцієнті теплового розширення легко утворюється конвективний потік, що відносить тепло. З теплофізичних властивостей: температура плавлення складає мінус 50°C при 2 атм, температура кипіння (сублімації) складає мінус 63°C , що означає можливість застосування при низьких температурах.

2.3.4. Характеристики рідких діелектриків

Діелектрична проникність визначається дипольним моментом і поляризованістю молекул. Наприклад, у неполярного діелектрика гексану дипольний момент відсутній, поляризація має чисто електронний характер і, внаслідок цього, діелектрична проникність мала $\epsilon \leq 2$. Трансформаторна олива, що є сумішшю речовин, має у своєму складі невелику кількість полярних молекул, що мають дипольний момент. Тому ϵ зростає до 2,2 - 2,4. Касторова олива має більше полярних молекул, отже, більше ϵ ($\epsilon \approx 4,5$). Етиловий спирт, гліцерин, вода є представниками полярних речовин, для яких діелектрична проникність складає 24, 40, 81 відповідно. Для неполярних рідин $\epsilon < 3$.

Діелектричну проникність можна розрахувати, знаючи концентрацію (n) і поляризованість молекул (α). Для цього застосовується формула Клаузиуса-Моссотти

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{n\alpha}{3 \cdot \epsilon_0}, \quad (19)$$

Електропровідність рідин визначається іонізацією молекул, наявністю в рідині домішок особливого сорту: іонофорів і іоногенів, виникненням електрогідродинамічних течій. Крім того, в рідинах виникають так звані подвійні електричні шари.

Подвійний електричний шар - це утворення в рідині, на межі з іншими тілами (електроди, діелектрики, що не змішуються в рідині), заряджених шарів з підвищеною електропровідністю, причому поверхня розділу і об'єм рідини придбавають заряди різного знаку.

Утворення подвійних шарів актуальне для технічних рідких діелектриків, наприклад для трюного транспорту паливних діелектричних середовищ типу нафти, конденсату і так далі. Усунення подвійних шарів може бути здійснене тільки при ретельному очищенні діелектричних рідин від домішок, що іонізуються. Очищення діелектричних рідин може здійснюватися дистиляцією, у тому числі під вакуумом, частковою кристалізацією, адсорбцією, іонним обміном. При цьому, як правило, зменшується електропровідність, діелектричні втрати, зростає електрична міцність.

Основною домішкою, що дає провідність рідких діелектриків, є вода, а основними домішками, що зменшують електричну міцність, є мікрочастки, мікробульбашки і вода. Тому в практиці енергосистем для регенерації трансформаторної оливи його фільтрують, обезгазують вакуумуванням, осушують за допомогою пропускання через об'єм, заповнений адсорбентами (цеолітами, або силікагелем) [10].

Цеоліти - тверді речовини природного або штучного походження, що мають велику питому поверхню за рахунок пір молекулярних розмірів і можливість адсорбції домішок в цих порах.

Силікагель - пористий адсорбент для поглинання вологи і полярних домішок. Він має меншу вибірковість по відношенню до різних домішок і меншу питому поверхню в порівнянні з цеолітами.

Електропровідність рідин найрадикальніше (до 6 порядків величини в порівнянні з даними з довідників) зростає після застосування нового способу очищення електродіалізу.

Електродіаліз - спосіб видалення іонів з проміжку за рахунок пропускання постійного струму при використанні іонообмінних мембран, катіонообмінні (носії заряду - катіони) біля катода і аніонообмінні (носії заряду - аніони) у анода. За рахунок різних способів очищення рідин в дослідженнях вдавалося отримати електропровідність не вище за електропровідність кращих твердих діелектриків, а саме до 10^{-19} См/м.

Електрична міцність - так само, як і електропровідність, значною мірою є технологічною характеристикою рідкого діелектрика і електродів, способів приготування і експлуатації ізоляційного проміжку. На неї впливають не лише ті домішки, які визначають електропровідність, але і форма і матеріал електродів, тривалість імпульсу, наявність бульбашок. Є більш загальні і очевидні прийомів збільшення електричної міцності: дегазація рідини, пропускання через адсорбент, пропускання через фільтр з субмікронними розмірами пір. Деякі з цих способів використовуються в енергосистемах для осушення і регенерації оливи.

2.3.5. Пробій рідких діелектриків

Пробій рідких діелектриків відбувається при більш високих, ніж в газі, значеннях пробивної напруги, за інших рівних умов. Механізм електричного пробою рідин спочатку вважався аналогічним механізму пробою газів, вважаючи рідину щільним газом. Це ґрунтувалося на схожості картини розряду і на деякій схожості розрядних залежностей. Проте пряме, безпосереднє застосування газових аналогій неправильне. Річ у тому, що поведінка електронів в рідині кардинально відрізняється від поведінки електронів в газі. Молекули рідини розташовані так близько один одному, так сильно взаємодіють один з одним, що електрон не може вільно рухатися і прискорюватися в електричному полі. У рідині, окрім особливо чистих зріджених благородних газів, вільні електрони не можуть існувати. При попаданні вільних електронів в рідину вони спочатку сольватуються (сольватація - ця електростатична взаємодія між частками (іонами, молекулами) розчиненої речовини і розчинника), потім прилипають до нейтральних молекул, утворюючи тим самим, негативні іони. Тому поняття довжини вільного пробігу для рідини ввести неможливо. Груба оцінка принципів обмежень електричної міцності може бути зроблена з наступних міркувань. Вважаємо, що електрон може прискорюватися упродовж міжмолекулярної відстані. Використовуючи як довжину пробігу λ міжмолекулярна відстань, можна отримати оцінку граничної електричної міцності рідини як $W = e \cdot \lambda \cdot E_{\text{пред}}$. Підставляючи значення $10 \cdot 10^{-10}$ м, $W \approx 5 \text{ eV}$, отримаємо, що $E_{\text{пред}} \approx 10^{10} \text{ В/м}$. Експерименти дають значення на 3 - 4 порядки менше [5].

Пробій технічних рідин може бути пов'язаний з газовими включеннями, що викликає іонізацію газу і місцеве перегрівання рідини, що призводить до утворення газового каналу в ній. Вода в діелектриці також сильно знижує електричну міцність.

Механізм пробією рідкого діелектрика з емульгованою вологою був запропонований Гемантом [8]. У відсутність зовнішнього електричного поля частки вологи в рідкому діелектрику набувають форми з мінімальною поверхнею, тобто форму кулі, і залежно від співвідношень щільності води і рідкого діелектрика певним чином розподілені за об'ємом останнього. При прикладанні до діелектрика електричного поля частки вологи, поляризуючись, втягуються в міжелектродний простір, набуваючи при цьому форми еліпсоїдів обертання з великою піввіссю, спрямованою по полю. Як критерій Гемантом прийнята умова: коли краплі, вишикувавшись по полю, перекриють на 60 - 70 % міжелектродний простір, станеться пробій. При пробію, за рахунок підвищених температур в каналі пробією, відбувається випар вологи. Внаслідок цього, при повторних пробіях сильно зволжених рідин може спостерігатися збільшення електричної міцності за рахунок підсушування.

Механізм пробією рідкого діелектрика з твердими (у тому числі і провідникові) домішками був запропонований А. Ф. Вальтером [8]. При прикладанні електричного поля в місцях скупчення твердих часток за рахунок діелектричних втрат відбувається розігрівання, в результаті якого рідина скипає з виділенням газоподібних продуктів. Але оскільки електрична міцність газу набагато нижча електричної міцності рідкого діелектрика, пробій відбуватиметься по цих газових включеннях.

2.3.6. Вживані і перспективні рідкі діелектрики

Найбільш поширений в енергетиці рідкий діелектрик - це трансформаторна олива. Трансформаторна олива - очищена фракція нафти, що отримується при перегонці, кипляча при температурі від 300 ° С до 400 ° С. Залежно від походження нафти мають різні властивості, і ці властивості початкової сировини відбиваються на властивостях оливи. Вона має складний вуглеводневий склад з середньою вагою молекул 220 - 340 а.е., і містить основні компоненти, приведені в таблиці 2 [5].

Кожен з компонентів оливи грає певну роль при експлуатації. Парафіни і циклопарафіни забезпечують низьку електропровідність і високу електричну міцність. Ароматичні вуглеводні зменшують старіння оливи і збільшують стійкість до часткових розрядів в об'ємі оливи.

Таблиця 2

Орієнтовний склад трансформаторної оливи

Орієнтовний склад трансформаторної оливи	Відсоток, %
1. Парафіни	10-15
2. Нафтени або циклопарафіни	60-70

3. Ароматичні вуглеводні	15-20
4. Асфальто-смолянисті речовини	1-2
5. Сірчисті з'єднання	< 1
6. Азотисті з'єднання	< 0,8
7. Нафтеніві кислоти	<0,02
8. Антиокисна присадка (іонол)	0,2-0,5

Асфальто-смолянисті, сірчисті, азотисті з'єднання і нафтеніві кислоти є домішками і не грають позитивної ролі. Асфальто-смолянисті з'єднання відповідальні за виникнення осаду в оливи і за її колір. Сірчисті, азотисті з'єднання і нафтеніві кислоти відповідальні за процеси корозії металів в трансформаторній оливі.

З основних характеристик оливи відмітимо, що воно є пальним, що біорозкладається, практично не токсичне, таке, що не порушує озоновий шар.

Щільність оливи зазвичай знаходиться в діапазоні $(0,84 - 0,89) \cdot 10^3$ кг/м³. В'язкість є однією з найважливіших властивостей оливи. З позицій високої електричної міцності бажано мати олію більш високої в'язкості. Для того, щоб добре виконувати свої додаткові функції в трансформаторах (як охолоджувальне середовище) і вимикачах (як середовище, де рухаються елементи приводу), олива повинна мати невисоку в'язкість, інакше трансформатори належним чином не охолоджуватимуться, а вимикачі - розривати електричну дугу у встановлений для них час. Тому вибирають компромісне значення в'язкості для різних олій. Кінематична в'язкість для більшості олій при температурі 20° С складає $(28 - 30) \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Температурою застигання називається температура, при якій олива загусає настільки, що при нахилі пробірки з охолодженою оливою під кутом 45° його рівень залишиться незмінним впродовж однієї хвилини. У масляних вимикачах температура застигання має вирішальне значення. Свіжа олива не повинна застигати при температурі мінус 45° С; у південних районах країни дозволяється застосовувати олію з температурою застигання мінус 35° С. Для експлуатаційних олій допускається ряд відступів від нормованої температури застигання залежно від того, чи знаходиться олива в трансформаторі або вимикачі, працює в закритому приміщенні або ж на відкритому повітрі. Для спеціальних арктичних сортів оливи температура застигання зменшується до мінус (60 - 65)° С, проте при цьому знижується і температура спалаху до 90 - 100° С.

Температурою спалаху називається температура оливи, що нагрівається в тиглі, при якій його пари утворюють з повітрям суміш, займисту в момент піднесення до неї полум'я. Спалах відбувається настільки швидко, що олива не устигає прогрітися і спалахнути. Температура спалаху трансформаторної оливи не має бути нижча 135° С. Якщо нагрівати олію вище за температуру спалаху, то настає такий момент, коли при піднесенні полум'я до оливи вона спалахує. Температура, при якій олива спалахує і горить не менше 5 с, називається температурою займання оливи. Температура, при якій відбува-

ється займання в закритому тиглі, у присутності повітря, без піднесення полум'я, називається температурою самозаймання. Для трансформаторної оливи вона складає 350 – 400 ° С. З інших теплофізичних характеристик відмітимо порівняно невелику теплопровідність λ от 0,09 до 0,14 Вт/(м·К), що зменшується залежно від температури. Теплоємність, навпаки, збільшується з ростом температури від 1,5 кДж/(кг·К) до 2,5 кДж/(кг·К). Коефіцієнт теплового розширення оливи визначає вимоги до розмірів розширювального бака трансформатора і складає приблизно $6,5 \cdot 10^{-4}$ 1/К.

Питомий опір оливи нормується при температурі 90° С і напруженості поля 0,5 МВ/м, і він не повинен перевищувати $5 \cdot 10^{10}$ Ом·м для будь-яких сортів олій. Відмітимо, що питомий опір, як і в'язкість, значно падають з ростом температури (більш ніж на порядок при зменшенні температури на 50 ° С).

Діелектрична проникність оливи невелика і коливається в межах 2,1 - 2,4. Тангенс кута діелектричних втрат визначається наявністю домішок в оливи. У чистій оливи він не повинен перевищувати $2 \cdot 10^{-2}$ при температурі 90° С і робочій частоті 50 Гц. У окисленій забрудненій і зволоженій оливи $\text{tg}\delta$ зростає і може досягати більш ніж 0,2. Електрична міцність оливи визначається в стандартному розряднику з півсферичними електродами діаметром 25,4 мм і міжелектродною відстанню 2,5 мм (рис. 9)

[ГОСТ 6581 – 75]. Пробивна напруга повинна складати не менше 70 кВ, при цьому в розряднику електрична міцність оливи буде не менше 280 кВ/см.

Існує великий розрив між терміном служби трансформатора і терміном служби оливи. Трансформатор може працювати без ремонту 10 - 15 років, а олива вже через рік вимагає очищення, а через 4 - 5 років - регенерації.

Заходами, що дозволяють продовжити термін експлуатації оливи, є:

- захист оливи від зіткнення із зовнішнім повітрям шляхом установки розширювачів з фільтрами, що поглинають кисень і воду, а також витіснення з оливи повітря;
- зниження перегрівання оливи в умовах експлуатації;
- регулярні очищення від води і шламу;
- застосування для зниження кислотності безперервної фільтрації оливи; підвищення стабільності оливи шляхом введення антиокисників.

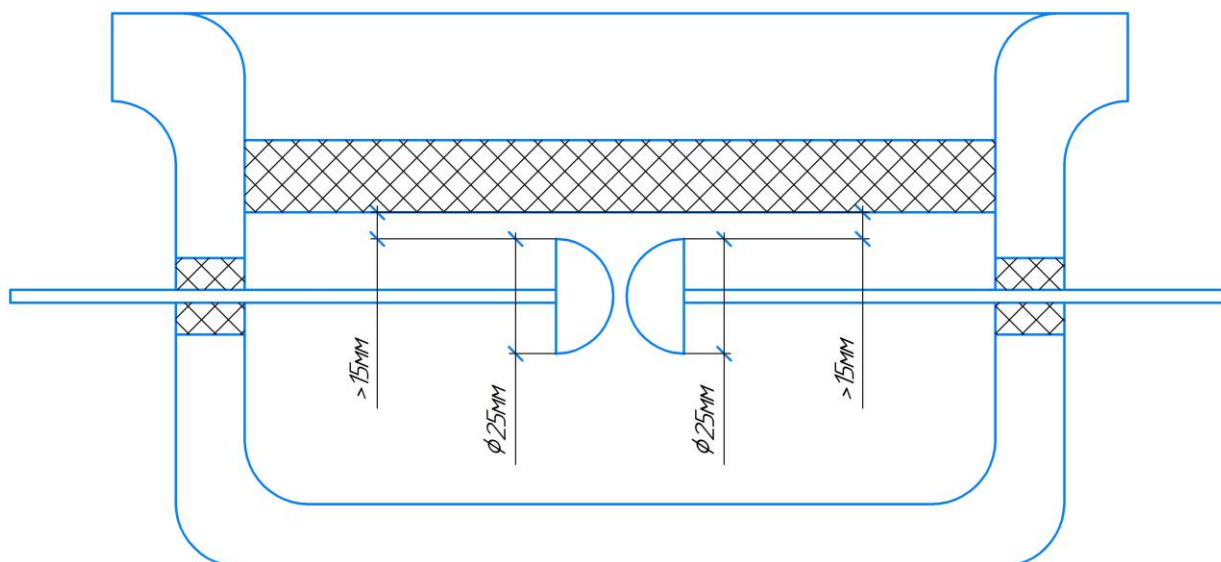


Рис. 9. Конфігурація розрядника для визначення електричної міцності трансформаторної оливи

Антиокисна присадка спеціально вводиться в олию для запобігання його окисленню під дією локальних високих температур і реакцій з провідниковими і діелектричними матеріалами. Зазвичай як присадку використовують іонол, рідше застосовуються і інші добавки.

Електрична міцність сухої трансформаторної оливи не залежить від температури, коли починають випаровуватися легкі фракції оливи, утворюючи бульбашки газу в рідині. Вимоги, що пред'являються до ізоляційних олій, нормують усі сторонні домішки в оливі. У сухої оливи $E_{пр} = 20 - 25$ МВ/м, а у оливи, що була в експлуатації, $E_{пр} = 4 - 5$ МВ/м. Для повторного використання олию піддають регенерації [4, 6, 10].

Під терміном конденсаторні оливи об'єднана група різних діелектриків, вживана для просочення паперово-масляної і паперово-плівкової ізоляції конденсаторів. Найбільш поширена конденсаторна олива по ГОСТ 5775-68 роблять з трансформаторної оливи шляхом глибшого очищення. Відрізняється від звичайних олив більшою прозорістю, меншим значенням $\text{tg}\delta$ (більш ніж вдесятеро).

Касторова олива рослинного походження, вона виходить з насіння рицини. Основна область використання - просочення паперових конденсаторів для роботи в імпульсних умовах. Щільність касторової оливи $950 - 970$ кг/м³, температура застигання від мінус 10° С до мінус 18° С. Його діелектрична проникність при 20° С складає $4,0 - 4,5$, а при 90° С $\epsilon = 3,5 - 4$. Тангенс кута діелектричних втрат при 20° С рівний $0,01 - 0,03$, а при 100° С $\text{tg}\delta = 0,2 - 0,8$; пробивна напруга при 20° С дорівнює $15 - 20$ МВ/м. Касторова олива не розчиняється у бензині, але розчиняється в етиловому спирті. На відміну від нафтових олив касторова не викликає набрякання звичайної гуми. Цей діелектрик відноситься до слабополярних рідких діелектриків, його питомий опір за нормальних умов складає $10^8 - 10^{10}$ Ом·м.

Кабельні оливи призначені для просочення паперової ізоляції силових кабелів. Основою їх також є нафтові оливи. Від трансформаторної оливи відрізняються підвищеною в'язкістю, збільшеною температурою спалаху і зменшеними діелектричними втратами. З марок оливок відмітимо МН-4 (малов'язка, для заповнення кабелів низького тиску), С-220 (високов'язка для заповнення кабелів високого тиску), КМ-25 (найбільш в'язка).

Другий тип рідких діелектриків - важкогорючі і негорючі рідини. Рідких діелектриків з такими властивостями досить багато. Найбільше поширення в енергетиці і електротехніці отримали хлордифеніли. У зарубіжній літературі вони називаються хлорбіфенілами. Це речовини, що мають у своєму складі подвійне бензолоне кільце, тобто ди(б) фенільне кільце і приєднані до нього один або декілька атомів хлору. В Україні застосовуються діелектрики цієї групи у вигляді сумішей, в основному суміші пентахлордифеніла з трихлордифенілом. Комерційні назви деяких з них - "совол", "совтол", "калория-2". Хлордифеніли є хорошими діелектриками. У них підвищена діелектрична проникність складає 5 - 6 в порівнянні з трансформаторною оливою із-за полярності зв'язку електронегативного хлору з дифенільним кільцем. Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ ненабагато вищий, ніж у оливи, електрична міцність також висока. Застосування цих діелектриків було обумовлене як цими властивостями, так і, головним чином, їх негорючістю. Тому в пожежо-небезпечних умовах (шахти, хімічні виробництва і тому подібне) використовували трансформатори і інші електричні апарати, заповнені хлордифенільними діелектриками. Проте в усього класу цих речовин є два дуже істотних недоліки - висока токсичність і сильний вплив на озоновий шар. Хоча токсичність є очевидним недоліком, але найбільший негативний вплив на застосування хлордифенілов зробив другий його недолік. Найбільш небезпечні речовини, в т.ч. фреони (холодоагенти в побутових холодильниках) і хлордифеніли були обмежені у виробництві, починаючи з 1980 року, а до 2000 року їх не повинно бути і в експлуатації відповідно до Монреальської Конвенції. Проблема пошуку відповідного пожежобезпечного рідкого діелектрика, що виникла після заборони хлордифенілів досі не розв'язана. У кожній країні її намагаються вирішувати по-своєму. У Великобританії намагаються впроваджувати діелектрики на основі ефірів пентаеритриту (фірмова назва Мідель 7221, Мідель 7131), в Німеччині - діелектрики на основі ефірів фталевої кислоти (Bayelectrol, діоктилфталат). У Росії і деяких інших країнах найбільш перспективними для застосування вважаються силікони (силоксани) або кремнійорганічні рідини. Це величезний клас рідин з різними електро- і теплофізичними характеристиками. Добре очищені рідини володіють $\epsilon = 2,5 - 3,5$, $\text{tg}\delta < 10^{-3}$, $\rho > 10^{12}$ Ом·м.

Деякі рідини, на основі модифікованих поліметилетилсилоксанів мають температуру спалаху близько 300°C . До недоліків силоксанів відноситься те, що досліджені кремнійорганічні рідини не можуть забезпечити пожежобезпечність і, отже, не можуть повністю замінити хлордифеніли. Крім того, вони у декілька разів дорожче за трансформаторну оливу.

Дуже цікавий клас фторорганічних рідин. У зарубіжній літературі вони називаються перфторвуглеводи. По суті, це еквівалент звичайним органічним рідинам, тільки замість атома водню скрізь знаходиться атом фтору. Наприклад є аналоги органічним сполукам, таким як пентан C_5H_{12} – перфторпентан C_5F_{12} , гексан C_6H_{14} – перфторгексан C_6F_{14} и т.д. Існує навіть перфтортрансформаторна олива. (На відміну від справжньої трансформаторної оливи перфтортрансформаторна олива за нормальних умов є твердою речовиною і використовується як морозостійке мастило). Наявність фтору на місці водню означає, що речовина повністю окислювалася, оскільки фтор є найсильнішим окисником, сильнішим, ніж кисень. Тому фторуглеродні рідини інертні по відношенню до будь-яких дій, у тому числі стабільні під дією електричного поля і температури. Оскільки вони ні з чим не взаємодіють, вони не розчиняють оливи, гуму, воду і тому подібне. Високі характеристики фторвуглеродних рідин важливі для застосувань. Заміна атома Н на атом F призводить до нових властивостей і нових можливостей [5]:

- негорючість;
- висока термічна і хімічна стабільність;
- інертність по відношенню до металів, твердих діелектриків і гум;
- нетоксичність, відсутність кольору і запаху;
- можливість підбору рідин з різними точками кипіння і замерзання;
- низька розчинність води і висока розчинність газів;
- відсутність розчинності будь-яких нафтованих матеріалів;
- високий коефіцієнт температурного розширення.

Проведені дослідження поведінки деяких рідин при постійній і змінній напрузі показують, що за електрофізичними параметрами: питомий опір, тангенс кута діелектричних втрат, електрична міцність, вони значно перевершують аналогічні показники будь-яких інших рідин, включаючи мінеральні оливи. Вони нетоксичні, неокисні, мають низьку в'язкість в низькотемпературній області. Ряд рідин має точку замерзання мінус $70^\circ C$ і нижче. Основна перешкода до ширшого використання - порівняно висока ціна. Ця перешкода може бути усунена. Нині є напрям з розробки нової, дешевшої технології отримання перфторвуглеводів.

Приведемо чисельні значення деяких електрофізичних параметрів. Діелектрична проникність $\epsilon = 2,5 - 3,5$, $\text{tg}\delta < 10^{-3}$, $\rho > 10^{12}$ Ом·м, електрична міцність – до 500 кВ/см. Важливою особливістю є досить висока електрична міцність в газоподібному (пароподібному) стані – до 200 – 300 кВ/см, оскільки фторвуглеводні молекули мають високу спорідненість до електрона, тобто вони є електронегативними речовинами. З інших властивостей відмітимо не лише негорючість, але і термостабільність до температури більше $400^\circ C$.

Хоча теплопровідність фторвуглеводів в два-три рази нижча, ніж у трансформаторної оливи, проте виключно високий коефіцієнт температурного розширення призводить до виникнення потужних конвективних потоків. При цьому конвективний тепловідвід виявляється в 3 - 4 рази вище, ніж у транс-

форматорної оливи. Головний недолік дорожнеча - вони дорожчі за трансформаторну оливу в декілька десятків разів.

До теперішнього часу в енергетиці ці рідини не знайшли широкого застосування. За кордоном застосовуються для охолодження потужних випрямлячів і інверторів, що перетворюють змінний струм в постійний струм, для НВЧ пристроїв. Передбачуване створення компактних пожегобезпечних випарних трансформаторів для електротранспорту і компактних закритих розподільних пристроїв (ЗРП) можливо тільки на основі перфторвуглеводних рідин [5].

2.4. Тверді діелектрики

2.4.1. Характеристики твердих діелектриків

Тверді діелектрики - це надзвичайно широкий клас речовин, що містять речовини з електричними, теплофізичними, механічними властивостями, що радикально розрізняються. Наприклад, діелектрична проникність міняється від значення, що трохи перевищує одиницю, до більш ніж 50000, залежно від типу діелектриків: неполярний, полярний, сегнетоелектрик. Механізми поляризації у них різко розрізняються:

- чисто електронна поляризація у неполярних діелектриків типу поліетилену, полістиролу; при цьому діелектрична проникність мала, не більше 3; діелектричні втрати теж малі;
- іонна поляризація у іонних кристалів типу NaCl або дипольна у полярних діелектриків типу льоду, при цьому діелектрична проникність може знаходитися в межах від 3 - 4 до 100; діелектричні втрати можуть бути дуже значні, особливо на частотах обертання диполів і інших резонансних частотах;
- *доменна поляризація у сегнетоелектриків*; при цьому діелектрична проникність максимальна і може досягати 10000 - 50000; діелектричні втрати можуть бути дуже значні, особливо на резонансних частотах і в області підвищених частот.

Низька провідність твердих діелектриків обумовлена незначною концентрацією вільних носіїв заряду. При цьому рухливість іонів в гомогенних матеріалах дуже мала, рухливість електронів в чистих матеріалах велика, в технічно чистих - мала. Механізми електропровідності різні в різних речовинах. Іонна провідність реалізується у полідисперсних діелектриків (картон, папір, гетинакс, дерево) і іонних кристалів. У першому випадку іони пересуваються по межах розділу, утворених злиплими дисперсними частками.

Поява носіїв заряду значно пов'язана з вологістю цих матеріалів і визначається, дисоціацією домішок і полярних груп основної речовини на поверхні розділу. У разі іонних кристалів, в провідності беруть участь іони основної речовини, домішок, дефекти структури. Електронна провідність реалізується у титанатів барія, стронцію і так далі, електронна, діркова і іонна провідність у полімерів [5].

2.4.2. Пробій твердих діелектриків

Фізична картина пробою твердих діелектриків залежить як від властивостей діелектрика, так і від зовнішніх чинників, і може бути різною. Разом з іонізаційними процесами до пробою можуть призводити вторинні процеси, обумовлені сильним електричним полем: нагрів, хімічні реакції, часткові розряди, механічне напруження в результаті електрострикції, утворення об'ємних зарядів на межах неоднорідностей і т. д. Розрізняють декілька механізмів пробою твердих діелектриків: електричного, електротеплового, електрохімічного, іонізаційного.

Електричний пробій - це пробій, обумовлений ударною іонізацією або розривом зв'язків між частками діелектрика безпосередньо під дією електричного поля. Електрична міцність $E_{пр}$ твердих діелектриків при електричному пробіі лежить в порівняно вузьких межах: 100...1000 МВ/м, що близько до $E_{пр}$ сильно стислих газів і дуже чистих рідин. Величина $E_{пр}$ обумовлена, головним чином, внутрішньою будовою діелектрика (щільністю упаковки атомів, міцністю їх зв'язків) і слабо залежить від таких зовнішніх чинників, як температура, частота прикладеної напруги, форма і розміри зразка (за винятком дуже малої товщини). Цей вид пробою характерний для макроскопічно однорідних діелектриків з малими діелектричними втратами. Він протікає за час не більше $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, не обумовлений тепловою енергією, хоча величина електричної міцності при електричному пробіі в деякій мірі залежить від температури і супроводжується у своїй початковій стадії руйнуванням діелектрика в дуже вузькому каналі. Електричний пробій за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з небагатьох початкових електронів в твердому тілі створюється електронна лавина. Згідно з сучасними уявленнями ці електрони розсіюють енергію свого руху, накопичену в електричному полі, за рахунок збудження пружних коливань кристалічної решітки. Електрони, що досягли певної критичної швидкості, роблять відщеплення нових електронів, і стаціонарний стан порушується, тобто виникає ударна іонізація електронами в твердому тілі. Чисто електричний пробій має місце, коли виключений вплив провідності і діелектричних втрат, що обумовлюють нагрів матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. У разі однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу пробивна напруга при електричному пробіі може служити мірою електричної міцності речовини як такої. Такі умови вдається спостерігати для монокристалів лужно-галогідних з'єднань і деяких органічних полімерів. В цьому випадку $E_{пр}$ досягає більше 10^5 МВ/см. При цьому виді пробою величина електричної міцності в однорідному електричному полі від товщини не залежить і трохи знижується при підвищенні температури.

Електротепловий (тепловий) пробій - це пробій, обумовлений тепловими процесами, що протікають в діелектриці при дії на нього електричного поля і призводять до руйнування діелектрика. Тепловий пробій виникає, коли кількість тепла, що виділяється в діелектриці за рахунок діелектричних втрат,

перевищує кількість тепла, яке може розсіюватися в цих умовах. При цьому порушується теплова рівновага, і процес набуває лавиноподібного характеру. Явище теплового пробоя зводиться до розігрівання матеріалу в електричному полі до температур, що відповідають розплавленню, розтріскуванню, обвуглюванню і ін. Величина пробивної напруженості при тепловому пробое є характеристикою не лише матеріалу, але і виробу, в протилежність електричному і іонізаційному пробое, де пробивна напруженість може служити характеристикою матеріалу з точки зору електричної міцності. Пробивна напруга, обумовлена нагрівом діелектрика, пов'язана з частотою напруги, умовами охолодження, температурою довкілля та ін. Крім того, електротеплова пробивна напруга залежить від теплостійкості матеріалу. Органічні діелектрики (наприклад, поліетилен, полістирол), за інших рівних умов, мають нижчу електричну міцність при електротепловому пробое, чим неорганічні (кварц, кераміка) внаслідок малої теплостійкості.

Потужність, що виділяється в зразку діелектрика ємністю C , при поданні напруги U (діюче значення) з кутовою частотою ω визначається співвідношенням (14): $P_{\text{п}} = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta$, тоді як теплова потужність, що відводиться від зразка

$$P_p = k \cdot S \cdot (T - T_0),$$

(20)

де k – коефіцієнт тепловіддачі, S – площа зразка, T – температура зразка, T_0 – температура довкілля. Умова теплової рівноваги визначається рівністю потужностей, що поглинається і розсіюваною: $P_{\text{п}} = P_p$. При підвищенні температури $\text{tg}\delta$ зазвичай росте, і, починаючи з деякої критичної температури $T_{\text{кр}}$, значення $P_{\text{п}} > P_p$ (інша точка рівності $P_{\text{п}}$ і P_p відповідає стійкій рівновазі (рис. 9). В результаті перевищення тепловиділення над тепловіддачею діелектрик лавиноподібно розігрівається, що призводить до його руйнування (плавленню, згоранню). Згідно з умовою теплової рівноваги

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{k \cdot S \cdot (T_{\text{кр}} - T_0)}{\omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta}}. \quad (21)$$

Суворіший розгляд вимагає обліку зміни температури і $\text{tg}\delta$ по об'єму зразка діелектрика і відповідно у міру віддалення від електродів, а також нелінійні залежності параметрів в (22) залежно від температури діелектрика і частоти зовнішнього поля [2-3].

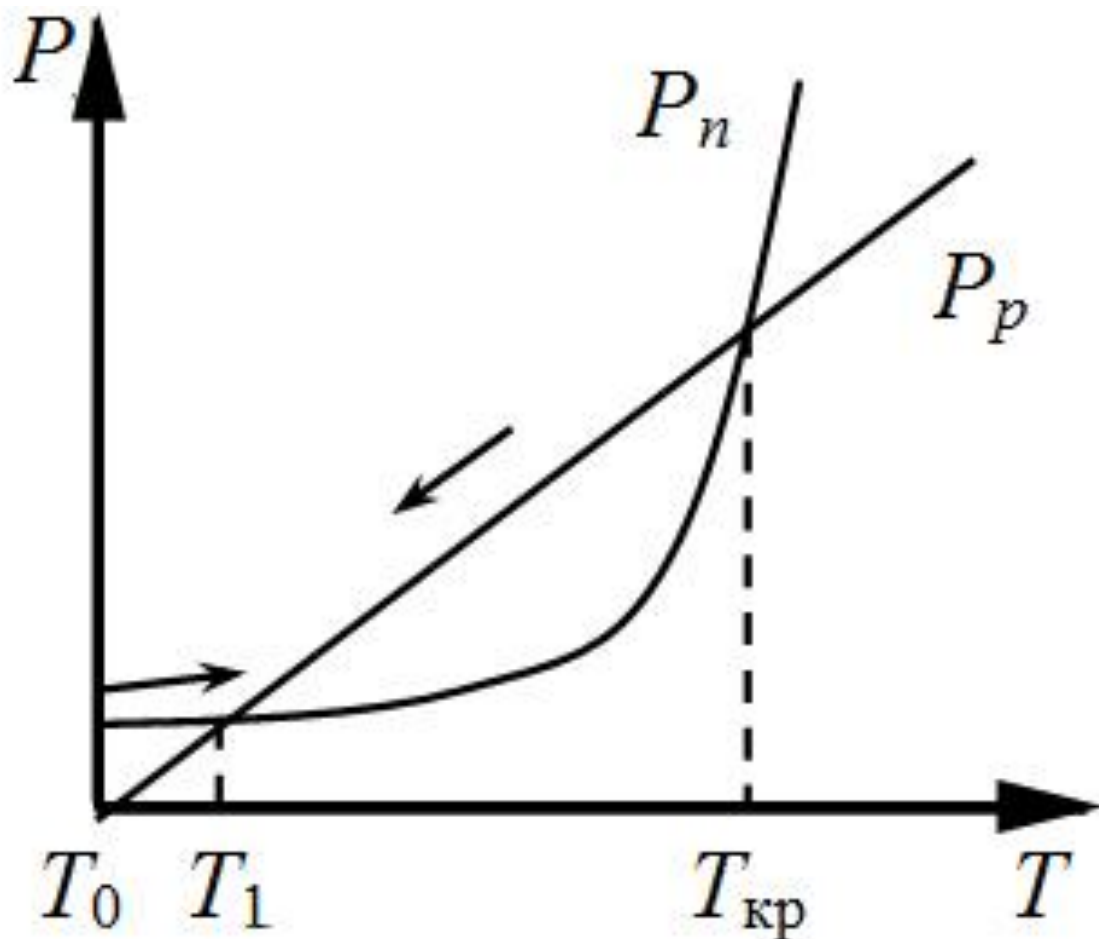


Рис. 10. Залежність потужності, що поглинається P_p і розсіюваною P_n діелектриком, від його температури

Електрохімічний пробій обумовлений хімічними процесами, що призводять до безповоротних хімічних змін діелектрика під дією електричного поля. Так, під дією прикладеної високої напруги, в діелектриках можуть виникати електролітичні явища, що викликають хімічне розкладання речовини і перенесення усередині діелектрика продуктів цього розкладання. Процес електролізу призводить до повільного проростання хімічних руйнувань матеріалу, властивості діелектрика постійно погіршуються, струм провідності росте, поки не настає пробій діелектрика. Цей процес називається електрохімічним старінням електроізоляційних матеріалів. Електроліз виникає в матеріалах з підвищеною іонною провідністю. До таких матеріалів відносяться скло, паперово-масляна ізоляція. Електрохімічне старіння різко прискорюється при зволоженні ізоляції і забрудненні її речовинами іонного характеру. Сприяє старінню ізоляції і дія високих температур.

Його характеристикою є час життя електричної ізоляції (проміжок часу від моменту подання напруги до пробою) або крива життя (рис. 11). Якщо на діелектрик тривалий час впливає електричне поле високої напруженості, то це призводить до безповоротних процесів, в результаті яких знижується $U_{пр}$, тобто відбувається електричне старіння ізоляції.

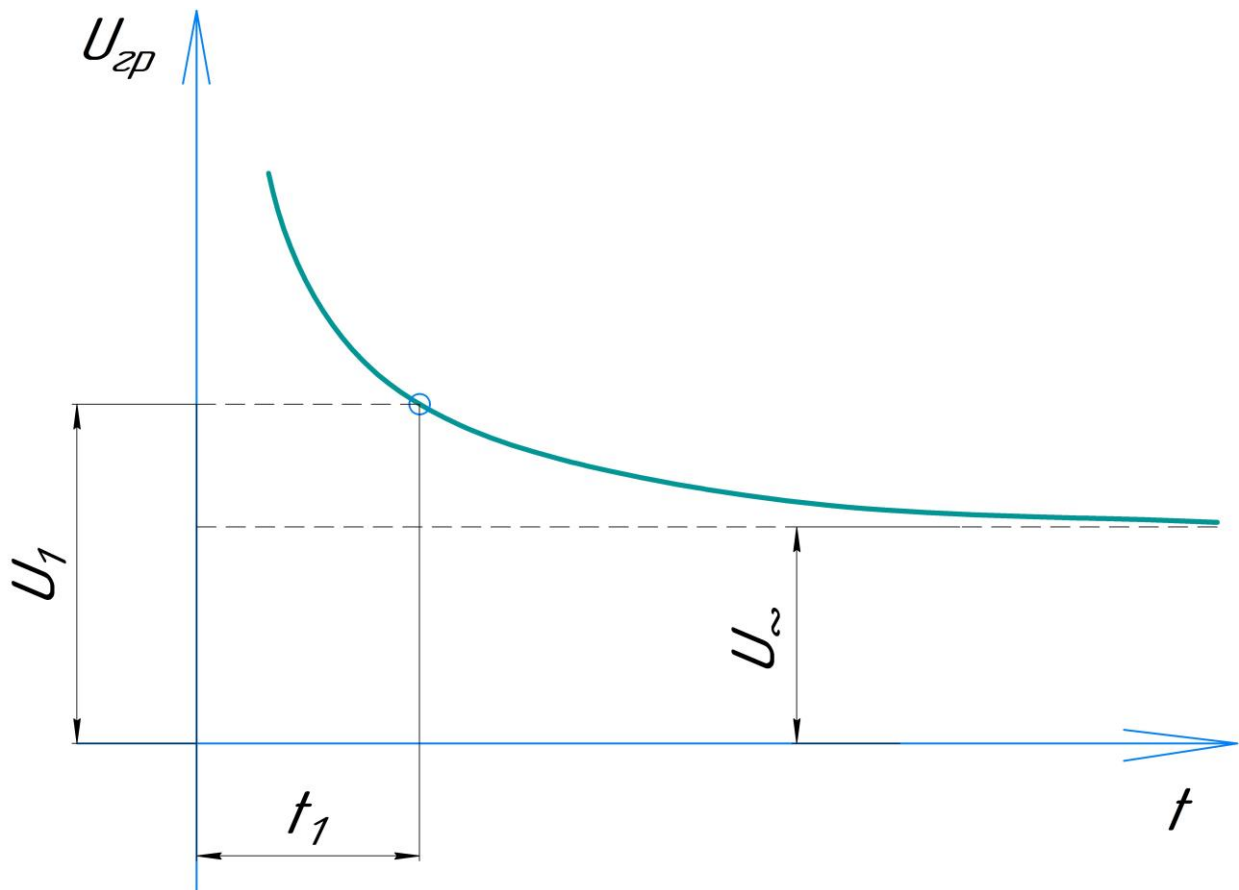


Рис. 11. Крива використання діелектрика

Іонізаційний пробій - це пробій, обумовлений іонізаційними процесами внаслідок часткових розрядів в діелектриці. Він найбільш характерний для діелектриків з повітряними включеннями (наприклад, паперова ізоляція). При великих напруженостях поля в повітряних порах виникає іонізація повітря, утворення озону, прискорених іонів, виділення тепла. Такого роду процеси чинять на діелектрик, що оточує газове включення, електричну, механічну і хімічну дію. В результаті виникає мікроскопічна ерозія матеріалу, що розширює об'єм газового включення. Поступово з газового включення починають проростати канали, у міру подовження яких розсіювана енергія зростає, сприяючи ще більшій швидкості ерозії матеріалу. Під дією високої температури в каналах часто утворюються смолянисті речовини, канали обвуглюються і стають такими, що проводять струм. Підвищена напруженість електричного поля на кінцях цих каналів веде до утворення нових бульбашок газу і подальшого розвитку розряду. За формою такий розряд схожий на стовбур дерева з гілками, тому він носить назву гіллястого або дендритного розряду. За часом іонізаційний пробій розвивається досить повільно, до тих пір, поки не буде перекритий увесь проміжок між електродами.

У твердих діелектриках, разом з об'ємним, можливий і поверхневий пробій, тобто пробій в рідкому або газоподібному діелектрику, прилеглому до поверхні твердої ізоляції. Оскільки $E_{пр}$ рідин і особливо газів нижче $E_{пр}$

твердих діелектриків, а нормальна складова напруженості електричного поля безперервна на межі розділу, то при однаковій відстані між електродами в об'ємі і на поверхні пробій в першу чергу відбуватиметься по поверхні твердого діелектрика. Щоб не допустити поверхневий пробій, необхідно подовжити можливий шлях розряду по поверхні. Тому поверхню ізоляторів роблять гофрованою, а в конденсаторах залишають не металізовані закраїни діелектрика. Поверхнєве $U_{пр}$ також підвищують шляхом герметизації поверхні електричної ізоляції лаками, компаундами, рідкими діелектриками з високою електричною міцністю.

Більшості діелектриків, що застосовуються на практиці, властиві різні види неоднорідності. Так, наприклад, керамічні діелектрики складаються з декількох фаз (кристалічною і скловидною), що мають різні електричні властивості, мають більшу або меншу кількість пір (повітряних включень). Пресовані і намотувальні вироби мають шарувату будову, їх шари, що чергуються, також мають неоднакові діелектричні властивості [4, 7].

В якості простого шаруватого діелектрика розглянемо діелектрик, що складається з двох плоскопаралельних шарів з різними електричними параметрами. Нехай ϵ_1 , γ_1 , h_1 характеризують діелектричну проникність, питому об'ємну провідність і товщину першого шару. Відповідні величини з індексом 2 відноситимуться до другого шару. Якщо прикласти до такого діелектрика напругу U , то напруженість електричного поля в кожному окремому шарі відрізнятиметься від середнього по товщині діелектрика значення: $E_{ср} = U/(h_1 + h_2)$. При постійній напрузі в стаціонарному режимі напруженість поля в першому E_1 і в другому E_2 шарах можна визначити по формулах:

$$E_1 = \frac{\gamma_2(h_1 + h_2)}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \cdot E_{ср}, \quad E_2 = \frac{\gamma_1(h_1 + h_2)}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \cdot E_{ср}. \quad (22)$$

Якщо γ_1 и γ_2 відрізняються один від одного, то залежно від співвідношення електричної провідності і товщини шарів напруженість поля в одному з шарів може перевищувати $E_{ср}$. Наприклад, E_1 може досягти значення першого шару. В цьому випадку станеться пробій цього шару, попри те, що у свою чергу це викличе зменшення загальної товщини ізоляції і приведе до підвищення $E_{2пр}$. Тому пробій одного шару, як правило, викликає пробій усього зразка в цілому, і, таким чином, неоднорідність матеріалу може викликати зниження пробивної напруги. Розподіл напруженості поля при змінній напрузі описується тими ж формулами (22) при заміні $\gamma_{1,2}$ на $\epsilon_{1,2}$.

Для максимальної пробивної напруги двошарового діелектрика повинні мати місце наступні умови:

- при постійній напрузі: $E_{1пр} \gamma_1 = E_{2пр} \gamma_2$;
- при змінній напрузі: $E_{1пр} \epsilon_1 = E_{2пр} \epsilon_2$.

При виконанні цих умов електрично міцніший шар працює при великих напруженостях поля, ніж електрично менш міцний.

Зважаючи на малих $E_{пр}$, ϵ і γ у газових включеннях пористого діелектрика, що знаходиться в сильному електричному полі, виникають часткові розряди. Саме ці розряди часто і є основним процесом, що призводить до пробую пористого діелектрика (іонізаційний пробій).

Напруженість поля, при якій виникають розряди в порі, складає при нормальному тиску і не занадто малому розмірі пори близько 3 МВ/м [8]. У дуже тонких шарах повітря пробій відбувається при підвищених напруженостях поля. Отже, чим менш розмір пір в діелектриці, тим більше високу напругу треба прикласти до зразка, щоб викликати розряди в порах. Для підвищення електричної міцності пористих діелектриків їх просочують, заповнюючи пори рідким або тверднучим електроізоляційним матеріалом з високою електричною міцністю. Так, для непросоченого кабельного паперу $E_{пр} = 3 \dots 5$ МВ/м, а для просоченої компаундом $E_{пр} = 40 \dots 80$ МВ/м.

Додамо деякі терміни, специфічні для твердих діелектриків :

- хімічна стійкість - здатність витримувати контакти з різними середовищами (кислота - кислотостійкість, луг - лугостійкість, озон - озоностійкість, олива - маслостійкість, вода - водостійкість);
- трекингостійкість - здатність протистояти дії електричної дуги;
- дендритостійкість - здатність протистояти утворенню дендриту.

2.4.3. Застосування твердих діелектриків в енергетиці

Усі діелектричні матеріали можна розділити на групи, використовуючи різні принципи. Наприклад, розділити на неорганічні і органічні матеріали.

Неорганічні діелектрики: скло, слюда, кераміка, неорганічні плівки (оксиди, нітрид, фториди), металофосфати, електроізоляційний бетон. Особливості неорганічних діелектриків - негорючі, як правило, світло-, озono- термостійкі, мають складну технологію виготовлення. Старіння на змінній напрузі практично відсутнє, а схильні до старіння на постійній напрузі.

Органічні діелектрики: полімери, віск, лаки, гуми, папери, лакотканини. Особливості органічних діелектриків - горючі (в основному), малостійкі до атмосферних і експлуатаційних дій, мають (в основному) просту технологію виготовлення, як правило, дешевші в порівнянні з неорганічними діелектриками. Старіння на постійній напрузі практично відсутнє, на змінній напрузі старіють за рахунок часткових розрядів, дендриту і водних трієнгів.

Застосування в енергетиці:

- лінійна і підстанційна ізоляція - це фарфор, скло і кремнійорганічна гума в підвісних ізоляторах високовольтних ліній, фарфор в опорних і прохідних ізоляторах, склопластики в якості несучих елементів, поліетилен, папір у високовольтних введеннях, папір, полімери в силових кабелях;
- ізоляція електричних приладів - папір, гетинакс, скло, текстоліт, полімери, слюдяні матеріали;
- машин, апаратів - папір, картон, лаки, компаунди, полімери;
- конденсатори різних видів - полімерні плівки, папір, оксиди, нітрид.

- З практичної точки зору в кожному випадку вибору матеріалу електричної ізоляції слід аналізувати умови роботи і вибирати матеріал ізоляції відповідно до комплексу вимог. Для орієнтування доцільно розділити основні діелектричні матеріали на групи за умовами застосування.
 - 1. Нагрівостійка електрична ізоляція.** Це в першу чергу вироби із слюдяних матеріалів, деякі з яких здатні працювати до температури 700 ° С. Скло і матеріали на їх основі (склотканина, стеклослюдиніти). Органосилікатні і металофосфатні покриття. Керамічні матеріали, зокрема нітрид бору. Композиції з кремнійорганіки з термостійким вяжучим. З полімерів високу нагрівостійкість мають поліімід, фторопласт.
 - 2. Вологостійка електрична ізоляція.** Ці матеріали мають бути гідрофобні (незмочування водою) і негігроскопічні. Яскравим представником цього класу є фторопласт. В принципі можлива гідрофобізація шляхом створення захисних покриттів.
 - 3. Радіаційно стійка ізоляція.** Це, в першу чергу, неорганічні плівки, кераміка, склотекстоліт, слюдинітові матеріали, деякі види полімерів (поліімід, поліетилен).
 - 4. Тропикостійка ізоляція.** Матеріал має бути гідрофобним, щоб працювати в умовах високої вологості і температури. Крім того, він має бути стійким проти плісневих грибків. Кращі матеріали: фторопласт, деякі інші полімери, гірші, - папір, картон.
 - 5. Морозостійка ізоляція.** Ця вимога характерна, в основному для гум, оскільки при зниженні температури усі гуми втрачають еластичність. Найбільш морозостійка кремнійорганічна гума з фенільними групами (до мінус 90° С).
 - 6. Ізоляція для роботи у вакуумі (космос, вакуумні прилади).** Для цих умов необхідно використати вакуумно-щільні матеріали. Придатні деякі, спеціально приготовані керамічні матеріали, малоприсадатні полімери.

2.4.4. Тверднучі матеріали

У початковому стані, під час введення їх в ізоляцію, що виготовляється, вони є рідинами, але потім тверднуть і в готовій ізоляції, під час експлуатації, є твердими тілами (наприклад, лаки і компаунди) [3, 7]. Лаки - це розчини плівкотвірних речовин: смол, бітумів, висихаючих олій, ефірів, целюлози або композицій цих матеріалів в органічних розчинниках. В процесі сушки лаку з нього випаровуються розчинники, а в лаковій основі відбуваються фізико-хімічні процеси, що призводять до утворення лакової плівки. По своєму призначенню електроізоляційні лаки ділять на просочувальні, покривні і склеювальні. Просочувальні лаки застосовуються для просочення обмоток електричних машин і апаратів з метою закріплення їх витків, збільшення коефіцієнта теплопровідності обмоток і підвищення їх вологостійкості. Покривні лаки дозволяють створити захисні вологостійкі, маслостійкі і інші покриття на поверхні обмоток або пластмасових і інших ізоляційних деталей. Склеювальні лаки призначаються для склеювання листочків слюди один з

одним або з папером і тканинами з метою отримання слюдяних електроізоляційних матеріалів (міканіти, микалента та ін.).

Емалі є лаками з введеними в них пігментами - неорганічними наповнювачами (оксиду цинку, двоокис титану, залізний сурик та ін.). Пігменти вводяться з метою підвищення твердості, механічної міцності, вологостійкості, дугостійкості і інших властивостей емалевих плівок. Емалі відносяться до покривних матеріалів. За способом сушки розрізняють лаки і емалі гарячої (пічний) і холодної (повітрям) сушки. Перші вимагають для свого затвердіння високої температури - від 80 до 200°C, а другі висихають при кімнатній температурі. Лаки і емалі гарячої сушки, як правило, мають більш високі діелектричні, механічні і інші властивості. З метою поліпшення характеристик лаків і емалей повітряної сушки, а також для прискорення затвердіння їх сушку іноді роблять при підвищених температурах від 40 до 80° С.

Основні групи лаків мають наступні особливості. Масляні лаки утворюють після висихання гнучкі еластичні плівки жовтого кольору, стійкі до вологи і до нагрітої мінеральної оливи. По нагрівостійкості плівки цих лаків відносяться до класу А. У масляних лаках використовують дефіцитні льняне і тунгові оливи, тому вони замінюються лаками на синтетичних смолах, стійкішими до теплового старіння.

Масляно-бітумні лаки утворюють гнучкі плівки чорного кольору, стійкі до вологи, але легко розчиняються в мінеральних оливах (трансформаторна і мастильна). По нагрівостійкості ці лаки відносяться до класу А (105° С). Глифталеві і масляно-глифталеві лаки і емалі відрізняються хорошою склеювальною здатністю по відношенню до слюди, паперів, тканин і пластмас. Плівки цих лаків мають підвищену нагрівостійкість (клас В). Вони стійкі до нагрітої мінеральної оливи, але вимагають гарячої сушки при температурах 120 - 130° С. Глифталеві лаки на основі немодифікованих глифталевих смол утворюють тверді негнучкі плівки, вживані у виробництві твердої слюдяної ізоляції (тверді міканіти). Масляно-глифталеві лаки після висихання дають гнучкі еластичні плівки жовтого кольору.

Кремнійорганічні лаки і емалі відрізняються високою нагрівостійкістю і можуть тривало працювати при 180 - 200°C, тому вони застосовуються у поєднанні із скловолоконистою і слюдяною ізоляцією. Окрім цього, плівки мають високу вологостійкість і стійкість до електричних іскр.

Лаки і емалі на основі поліхлорвінілових і перхлорвінілових смол відрізняються стійкістю до води, нагрітих олій, кислих і лужних хімічних реагентів, тому вони застосовуються в якості покривних лаків і емалей для захисту обмоток, а також металевих деталей від корозії. Слід звернути увагу на слабке прилипання поліхлорвінілових і перхлорвінілових лаків і емалей до металів. Останні спочатку покривають шаром ґрунту, а потім лаком або емаллю на основі поліхлорвінілових смол. Сушіння цих лаків і емалей робиться при 20° С, а також при 50 - 60° С. До недоліків такого виду покриттів відноситься їх невисока робоча температура, що становить 60 - 70° С.

РОЗДІЛ 3. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

3.1. Властивості і класифікація магнетиків

Магнітними матеріалами називаються речовини, що мають магнітні властивості, тобто здатністю намагнічуватися в магнітному полі і тим самим придбавати магнітний момент. Результуючий макроскопічний магнітний момент M є сумою елементарних магнітних моментів m для n атомів цієї речовини

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^n \vec{m}_i.$$

Магнітні властивості речовини характеризуються магнітною сприйнятливістю $\chi = M / H$, де M – магнітний момент одиниці об'єму речовини або намагніченість в магнітному полі напруженістю H . Магнітне поле у вакуумі, що створюється деякою системою провідників із струмом або сукупністю постійних магнітів, характеризується векторами магнітної індукції B і напруженості поля H , пов'язаними через магнітну постійну $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м]: $B = \mu_0 H$.

Магнітне поле в матеріалі, окрім напруженості поля H , що створюється струмом в намагнічуючій обмотці залежить так само від магнітних властивостей матеріалу. Повна магнітна індукція в матеріалі складає

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M,$$

де перший і другий члени правої частини є такими, що відповідають зовнішньому і внутрішньому полю. Внутрішнє магнітне поле характеризується магнітною сприйнятливістю χ ($M = \chi \cdot H$).

Одним з основних магнітних параметрів матеріалу є магнітна проникність. Розрізняють абсолютну $\mu = B / H = \mu_0(1 + \chi)$ і відносну $\mu = B / \mu_0 H = 1 + \chi$ магнітну проникність матеріалу. Звідки для магнітної сприйнятливості маємо $\chi = \mu - 1$.

Залежність відносної магнітної проникності від H має складний характер (рис. 12), причому максимальні значення μ дуже великі ($> 10^3 - 10^6$).

За значенням χ , її залежності від напруженості магнітного поля, температури і інших чинників виділяють наступні п'ять основних видів магнітних матеріалів: діа-, пара- і антиферомагнетики утворюють групу слабомагнітних матеріалів; ферро- і феримагнетики відносяться до групи сильномагнітних матеріалів.

У виробках електротехніки і електроніки найчастіше застосовуються феромагнетики. Усі феромагнетики характеризуються: великим значенням χ , здатністю намагнічуватися до насичення при звичайних температурах навіть в слабких полях, гістерезисом - залежністю магнітних властивостей від попереднього стану, точкою Кюрі - граничною температурою, вище за яку матеріал втрачає феромагнітні властивості.

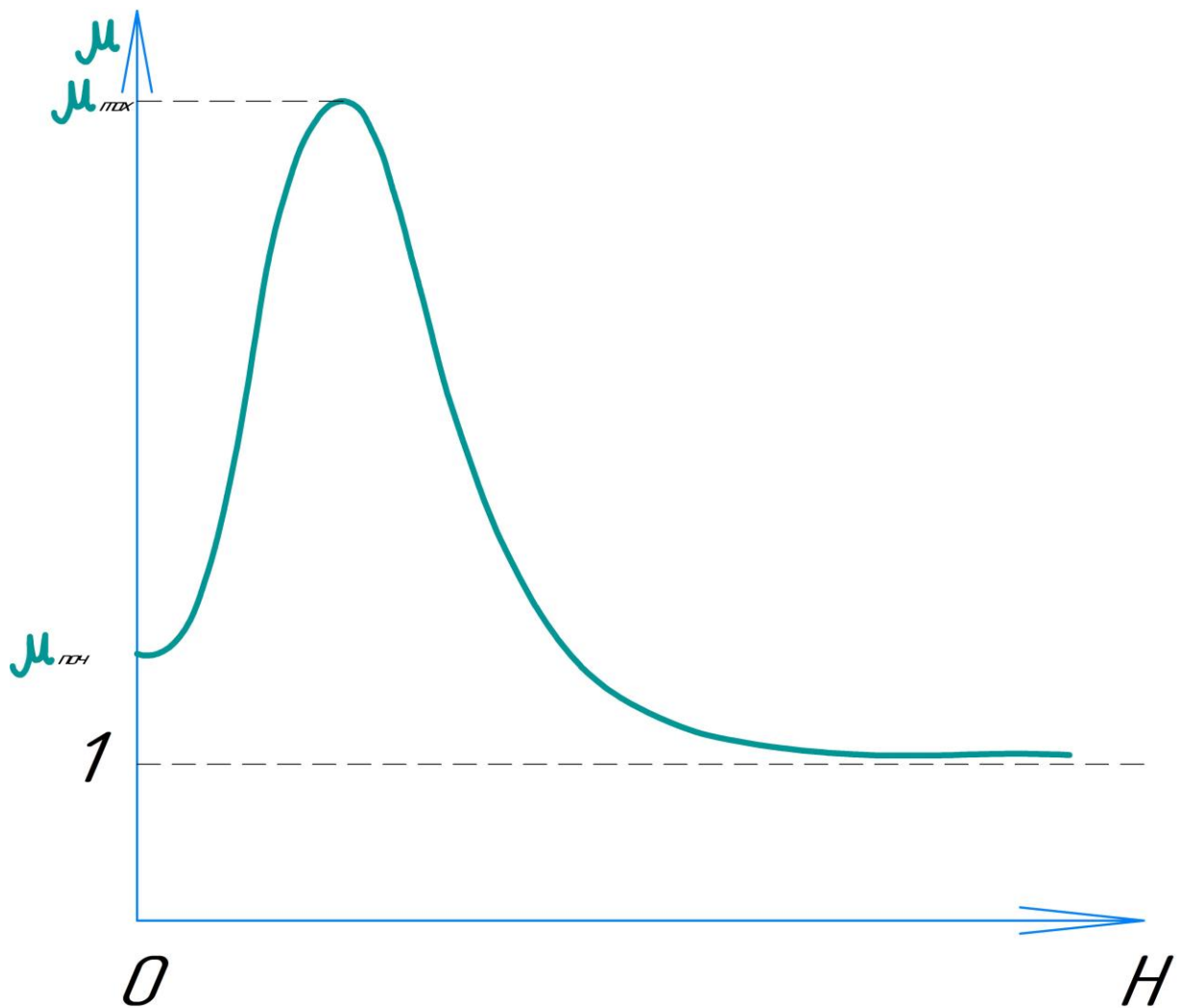


Рис. 12. Залежність відносної магнітної проникності від напруженості магнітного поля

До феромагнетиків відносяться залізо, нікель, кобальт і інші матеріали.

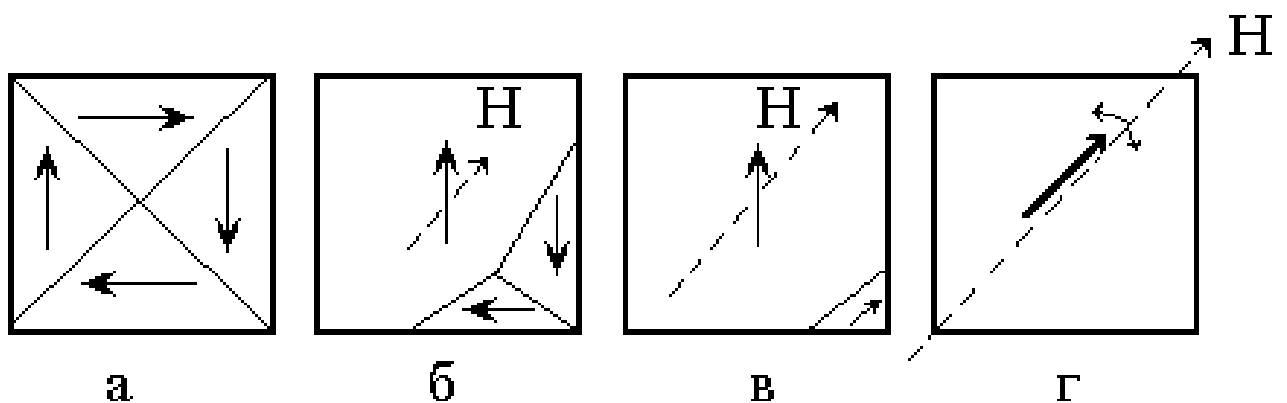


Рис.12. Зміна доменної структури феромагнетика по мірі наростання напруженості зовнішнього намагнічуючого поля

Феромагнетизм полягає в існуванні в речовині областей - доменів, в межах яких матеріал намагнічений до стану насичення. Магнітна сприйнятливості феромагнетиків досягає значень $10^5 - 10^6$ і істотно залежить від температури і напруженості магнітного поля (рис. 12).

Магнітні властивості матеріалів описуються залежностями B від H і втрат на перемагнічування P від індукції і частоти. Залежність виду $B(H)$ називають кривою намагнічення (рис. 13).

Основну криву намагнічення можна розділити на декілька ділянок, які характеризуються певними процесами намагнічення для феромагнетиків. У області слабких полів (область I) магнітна сприйнятливості і проникність не змінюються. Зміна магнітної індукції в цій області відбувається в основному із-за оборотних процесів, які обумовлені зміщенням меж доменів.

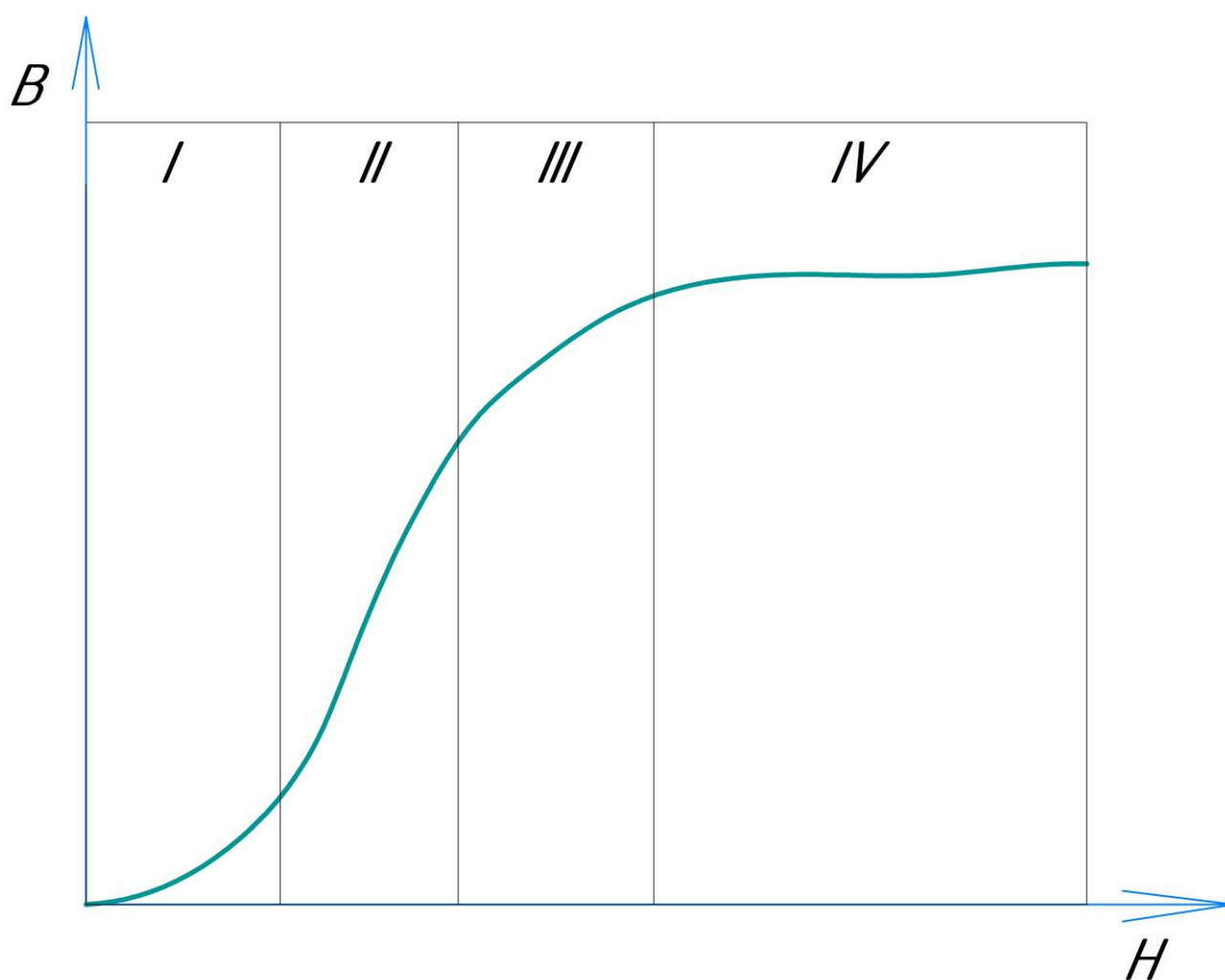


Рис. 13. Основна крива намагнічення феромагнетика

Крива намагнічення в області II характеризується тим, що відбувається неперервне зміщення меж доменів, тобто процес не є оборотним. У області наближення до насичення (область III) зміна індукції пояснюється в основному процесом обертання, коли напрям вектору намагніченості мимовільних областей наближається до напрямку зовнішнього поля. Повна орієнтація намагні-

ченості по полю відповідає технічному насиченню (кінець області III). Остання ділянка кривої (область IV) відповідає слабкому росту індукції зі збільшенням напруженості поля. В цьому випадку збільшення індукції відбувається завдяки росту намагніченості домена, тобто орієнтації спінових моментів окремих електронів, напрям яких не співпадає з напрямом зовнішнього поля внаслідок дезорієнтуючого впливу теплового руху [2, 3].

При циклічному перемагнічуванні крива намагнічення утворює петлю гістерезису (рис. 14). Розрізняють наступні типи залежностей:

- частинна петля (2), отримана при циклічній зміні напруженості при $H < H_m$;

- гранична петля (3), отримана при циклічній зміні напруженості $H \geq H_m$.

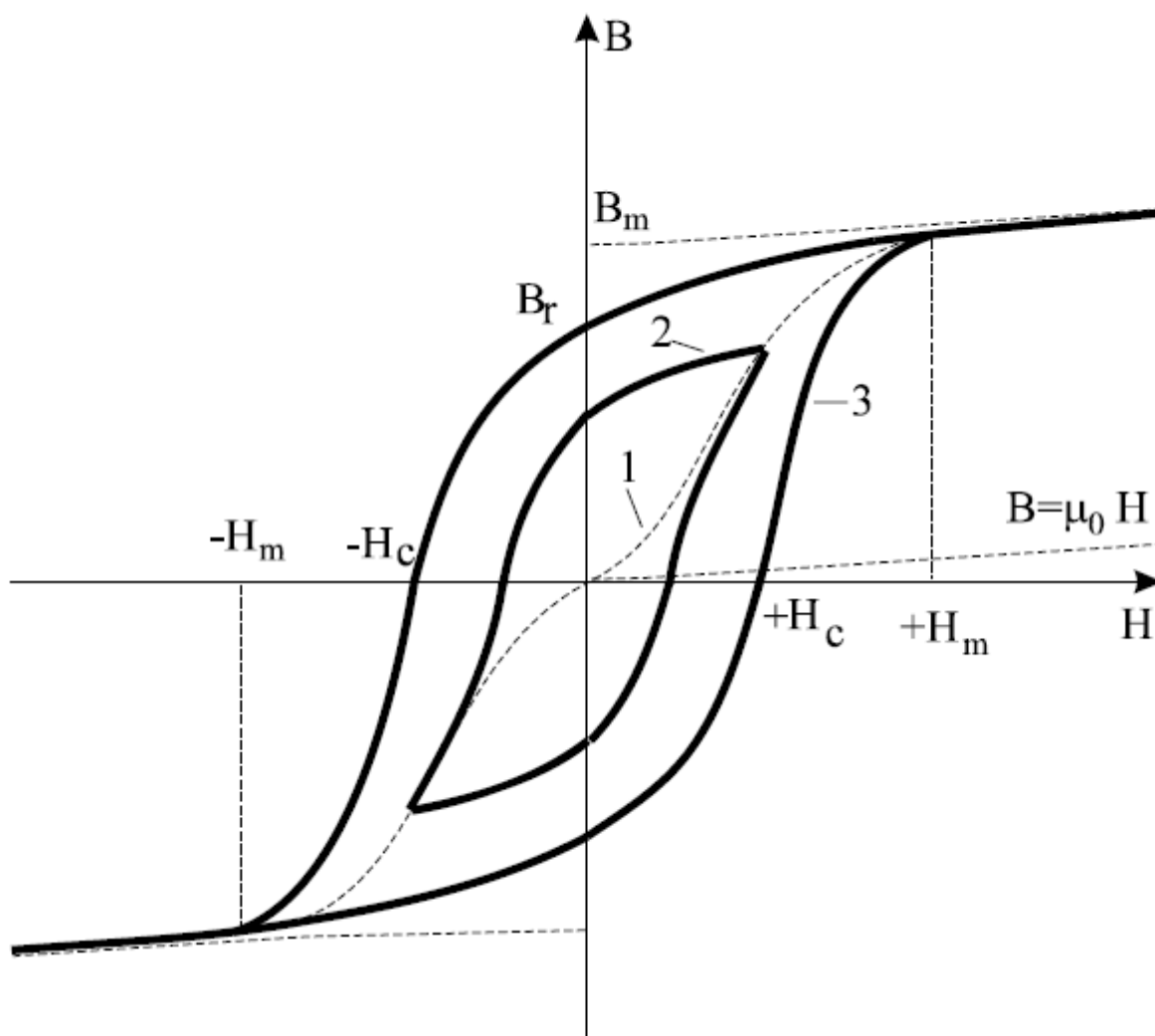


Рис. 14. Петля гістерезису

Основна крива намагнічення (1) є геометричним місцем вершин симетричних петель гістерезису, що виходять при циклічному перемагнічуванні, або отриману при монотонному збільшенні напруженості поля в заздалегідь розмагніченому зразку.

При досить великих значеннях H крива 1 асимптотично наближається до прямої $B = B_m + \mu_0 H$, где B_m – індукція насичення. Починаючи зі значення

H_m , при подальшому збільшенні напруженості петля гістерезису залишається практично незмінною. Усі частинні петлі, як симетричні, так і несиметричні, лежать усередині граничної петлі.

Основні параметри петлі гістерезису :

- залишкова індукція B_r (індукція, яка залишається в заздалегідь намагніченому зразку після зняття зовнішнього магнітного поля);
- коерцитивна сила H_C (розмагнічуюче поле, яке має бути прикладене до зразка, щоб індукція стала рівною нулю);
- втрати на гістерезис при перемагнічуванні матеріалу з частотою f :

$$P_r = f \cdot \left(\oint H dB \right) / \gamma, \text{ де } \gamma - \text{щільність матеріалу (кг/м}^3\text{)}.$$

По основній кривій намагнічення можуть бути визначені також:

початкова магнітна проникність $\mu_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}$, а також диференціальна маг-

нітна проникність $\mu_d = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{\mu_0 dH}$.

Магнітні властивості матеріалів характеризуються також реверсивною (зворотньою) магнітною проникністю μ_p , яка вимірюється на змінному сигналі малої амплітуди на тлі великого зміщуючого поля. Реверсивна проникність обумовлена явищем гістерезису в магнітних матеріалах.

Перемагнічування магнітних матеріалів в змінних полях збуджує вихрові струми, магнітне поле яких спрямоване зустрічно зовнішньому полю (рис. 15).

В результаті напруженість магнітного поля в матеріалі падає з видаленням углиб від поверхні. Вихрові струми вносять вклад у втрати на перемагнічування. Для зменшення втрат на вихрові струми на високих частотах слід застосовувати магнітомякі високочастотні матеріали (магнітодіелектрики, ферити), у яких значення питомого опору значно більше, ніж у низькочастотних матеріалів - електротехнічних сталей, пермалою.

Таким чином, втрати на перемагнічування складаються в основному з втрат на гістерезис і втрат на вихрові струми: $P = P_r + P_{вт}$.

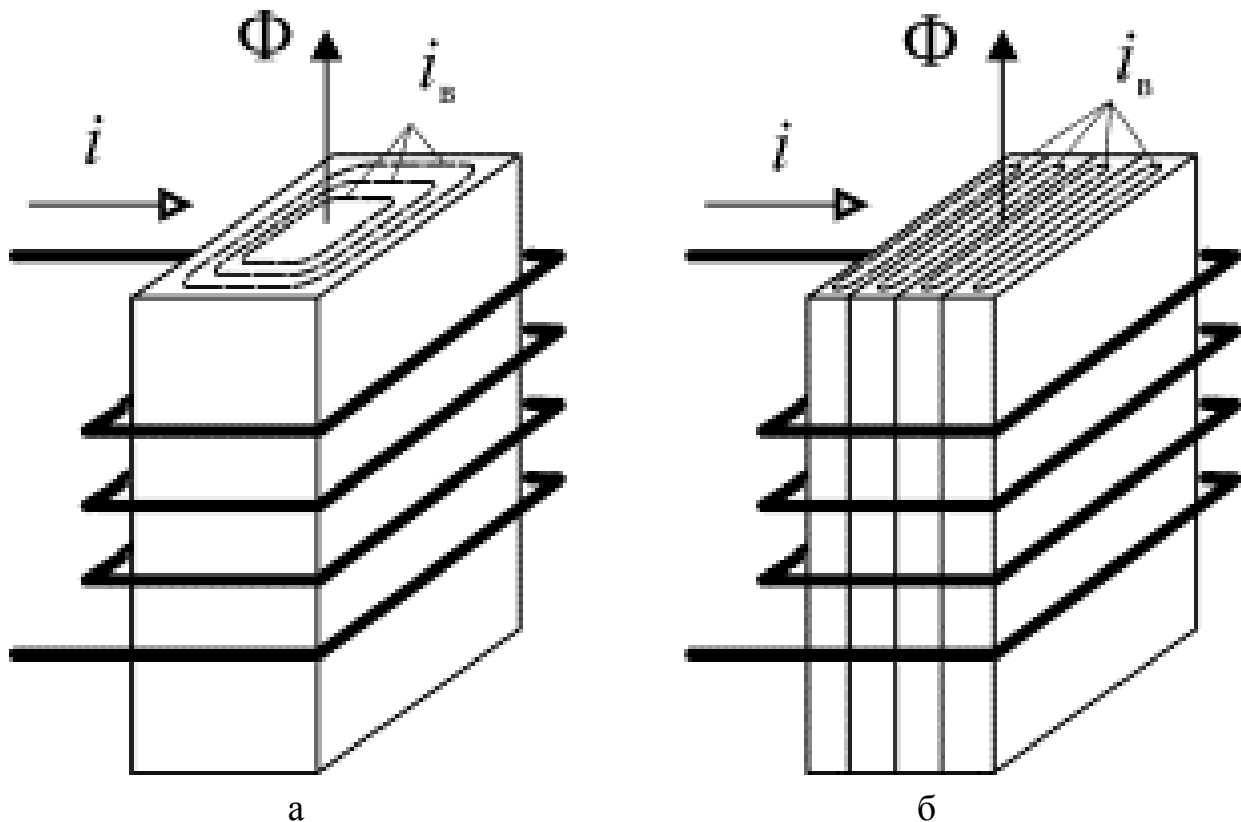


Рис. 15. Виникнення вихрових струмів : а) в суцільному феромагнетику; б) в пакеті з листів, ізольованих один від одного

3.2. Магнітомякі матеріали і їх характеристики

Розрізняють магнітомякі і магнітотверді магнітні матеріали.

Магнітомякі матеріали характеризуються значними магнітною проникністю, індукцією насичення, малою коерцитивною силою (не більше 4 кА/м) і, отже, вузькою петлею гістерезису. До магнітомяким матеріалів відносяться технічно чисте залізо, електротехнічні сталі, пермалой, магнітомякі ферити, магнітодіелектрики.

Технічно чисте залізо (низьковуглецева електротехнічна сталь) містить менше 0,05 % вуглецю і мінімальна кількість домішок інших елементів. Виходить прямим відновленням чистих руд. Залізо в чистому вигляді є магнітомяким матеріалом, магнітні властивості якого істотно залежать від вмісту домішок. Серед елементарних феромагнетиків залізо має найбільшу індукцію насичення (близько 2,2 Тл). У технічно чистого заліза магнітна проникність складає: $\mu_{\text{нач}} \sim (250 - 400)$, $\mu_{\text{max}} \sim (3500 - 4500)$, коерцитивна сила $H_C \sim (50 - 100)$ А/м, індукція насичення $B_m \sim 2,18$ Тл. Технічно чисте залізо застосовують як шихтовий матеріал для отримання майже усіх феромагнітних сплавів [4, 7].

Є два види особливо чистого заліза - електролітичне і карбонільне. Електролітичне залізо отримують шляхом електролізу розчину сірчанокисло-го або хлористого заліза. Магнітна проникність електролітичного заліза: $\mu_{\text{нач}} \sim 600$, $\mu_{\text{max}} \sim 15000$, коерцитивна сила $H_C \sim 30$ А/м, індукція насичення

$B_m \sim 2,18$ Тл. Зважаючи на високу вартість карбонільне залізо застосовують рідко.

Карбонільне залізо отримують за допомогою термічного розкладання пентакарбонілу заліза : $\text{FeCO}_5 \rightarrow \text{Fe} + 5\text{CO}$. У карбонільного заліза магнітна проникність $\mu_{\text{нач}} \sim 500$, $\mu_{\text{мак}} \sim 15000$, коерцитивна сила $H_c \sim 30$ А/м, індукція насичення $B_m \sim 2,18$ Тл.

Найбільше застосування в електротехніці отримала листова електротехнічна сталь. Ця сталь є сплавом заліза з кремнієм, вміст якого в ній 0,8 - 4,8%. Такі сталі, в які вводяться у малій кількості які-небудь речовини для поліпшення їх властивості, називаються легованими. Кремній вводиться в залізо у вигляді феросиліцію (сплав сислицида заліза FeSi із залізом) і знаходиться в нім в розчиненому стані. Кремній реагує з найбільш шкідливою (для магнітних властивостей заліза) домішкою - киснем, відновлюючи залізо з його оксидів FeO і утворюючи кремнезем SiO_2 , який переходить частково в шлак. Кремній також сприяє виділенню вуглецю із з'єднання Fe_3C (цементит) з утворенням графіту. Таким чином, кремній усуває хімічні сполуки заліза (FeO і Fe_3C), які викликають збільшення коерцитивної сили і збільшують вихрові струми. Попри те, що індукція насичення заліза зі збільшенням кремнію B_m трохи підвищується і досягає при 6,4 % кремнію великої величини ($B_m = 0,28$ Тл), все ж кремнію вводять не більше 4,8 %. Збільшення вмісту кремнію більше 4,8% призводить до того, що сталі придбавають підвищену крихкість, тобто механічні властивості їх погіршуються [9].

На теперішній час електротехнічна сталь виплавляється в основному в електросталеплавильних печах. Листи виготовляють плющенням сталевого зливка в холодному або гарячому стані. Тому розрізняють холодно- і гарячекатану електротехнічну сталь.

Залізо має кубічну кристалічну структуру. З досліджень намагнічення виявилось, що воно може бути неоднакове по різних напрямках цього куба. Найбільше намагнічення кристал має у напрямі ребра куба, меншим - по діагоналі грані і найменшим - по діагоналі куба. Тому бажано, щоб усі кристали заліза в листі вишикувалися в процесі плющення в ряди по напрямку ребер куба. Це досягається повторними плющеннями листів сталі, з сильним обтисканням (до 70%) і подальшим відпалом в атмосфері водню. Це сприяє очищенню сталі від кисню і вуглецю, а також укрупненню кристалів і орієнтуванню їх так, щоб ребра кристалів співпадали з напрямом плющення. Такі сталі називаються текстурованими (чи текстурованими). У них магнітні властивості по напрямку плющення вищі, ніж у звичайної гарячекатаної сталі [9].

Листи текстурованої сталі виготовляються холодним плющенням. Магнітна проникність їх вища, а втрати на гістерезис менші, ніж у гарячекатаних листів. Крім того, у холоднокатаної сталі індукція в слабких магнітних полях зростає сильніше, ніж у гарячекатаної, тобто крива намагнічення в слабких полях розташовується значно вище за криву для гарячекатаної сталі [7].

Проте, варто відмітити, що в результаті орієнтування зерен текстурованої сталі по напрямку плющення магнітна проникність по інших напрямках менша, ніж у гарячекатаних. Так, при індукції $B = 1,0$ Тл у напрямі плющення відносна магнітна проникність μ складає 50000, а в напрямі перпендикулярно плющенню 5500. У зв'язку з цим при зборці Ш-образних осердь трансформаторів застосовують окремі смуги сталі, вирізані вздовж плющення, які потім шихтують так, щоб напрям магнітного потоку співпадав з напрямом плющення сталі або складало б з ним кут 180° . Вітчизняна електротехнічна сталь розрізняється за вмістом в ній кремнію, за способом виготовлення листів, а також за магнітними і електричними властивостями.

Інформація про характеристики електротехнічної сталі відбита в маркуванні [8]. Сучасне маркування виконується чотирма цифрами - 1234. Перша цифра означає тип прокату сталі: 1 - гарячекатана ізотропна; 2 - холоднокатана ізотропна; 3 - холоднокатана анізотропна. Друга цифра визначається вмістом кремнію (0 - до 0,4%, 1 - до 0,8%, 2 - до 1,8%, 3 - до 2,8%, 4 - до 3,8%, 5 - більше 4,8%). Третя цифра - тип нормованих магнітних характеристик (0 - питомі втрати при $B = 1,7$ Тл, $f = 50$ Гц; 1 - питомі втрати при $B = 1,5$ Тл, $f = 50$ Гц; 2 - питомі втрати при $B = 1$ Тл, $f = 400$ Гц, 6 - в слабких полях при напруженості магнітного поля $H = 0,4$ А/м; 7 - в середніх полях при $H=10$ А/м). Четверта цифра визначає порядковий номер типу сталі [1].

Багато довідкових матеріалів спираються на прийняте раніше маркування. Приведемо її для повного уявлення про питання. Буква Э в позначенні сталі означає "електротехнічна сталь". Перша за буквою цифра (1, 2, 3 і 4) означає міру легування сталі кремнієм, причому вміст кремнію знаходиться в наступних межах у відсотках: для слабологованої сталі (Э1) від 0,8 до 1,8, для середньоологованої сталі (Э2) від 1,8 до 2,8, для підвищеноологованої сталі (Э3) від 2,8 до 3,8, для високоологованої сталі (Э4) від 3,8 до 4,8. Друга цифра відбиває втрати на перемагнічування. Ці втрати тим менше, чим більше цифра, тобто більше міра легування сталі кремнієм. Нулі після цих цифр означають, що сталь холоднокатана текстурована (0) і холоднокатана малотекстурована (00). Буква А вказує на особливо низькі питомі втрати при перемагнічуванні сталі.

Середня величина питомого електричного опору електротехнічної сталі ρ теж залежить від кількості кремнію. Опір тим вищий, чим більший вміст кремнію в сталі. Сталі марок Э1 мають опір $\rho = 0,25$ Ом \cdot мм²/м, марок Э2 – 0,40 Ом \cdot мм²/м, марок Э3 – 0,5 Ом \cdot мм²/м і марок Э4 – 0,6 Ом \cdot мм²/м.

Електротехнічна сталь випускається у вигляді листів шириною від 240 до 1000 мм, завдовжки від 720 до 2000 мм і завтовшки 0,1; 0,2; 0,35; 0,5 і 1,0 мм. Найбільше застосування мають текстуровані сталі, оскільки вони мають найкращі магнітні характеристики [9].

Пермалой - це сплав залізоникеля, сталь з високим процентним вмістом Cr, Ni, Mn, Co, Mo. Використовують у вигляді стрічок завтовшки 5,20 мікрон. Це "магнітомякий" матеріал (вузька петля гістерезису – H_c менша 5

А/м). Пермалой знаходить широке застосування в магнітних елементах вимірювальних, автоматичних і радіотехнічних пристроїв при їх роботі в слабких постійних і змінних полях з частотою до декількох десятків кілогерц, а для мікронного прокату і до більш високих частот.

Таблиця 3

Властивості магнітомяких феромагнітних матеріалів

Матеріал	Магнітна проникність		Коерцитивна сила	Індукція насичення	Питомий опір
	початкова	максимальна			
Технічно чисте залізо	250 - 400	3500 - 4500	50 - 100	2,18	0,1
Електролітичне залізо	600	15000	30	2,18	0,1
Карбонільне залізо	2000 - 3000	20000 - 21500	6,4	2,18	0,1
Монокристал чистісінького заліза	>20000	1430000	0,8	-	0,097
Електротехнічна сталь	200 - 600	3000 - 8000	10 - 65	1,95 - 2,02	0,25 - 0,6
Низьконікелевий пермалой	1500 - 4000	15000 - 60000	5 - 32	1,0 - 1,6	0,45 - 0,9
Високонікелевий пермалой	7000 - 100000	50000 - 300000	0,65 - 5	0,65 - 1,05	0,16 - 0,85

Магнітодіелектрик - дрібнодисперсний феромагнітний порошок, що формується в осердях єднальним матеріалом на основі полістиролу. Використовуються на високих частотах (1...500 кГц). Це альсифери і пресований пермалой - пресперм (порошок пермалою).

Ферит - феромагнітний порошок, що зпикається при високій температурі (~ 1200°C) і тиску до 30 Атм. Ферити технологічніші і дешевші у виробництві, але в діапазоні температур від мінус 60 до +125°C їх індукція змінюється на ±30 %, а у пермалою на ±5%. Літійцинкові, свинцовонікелеві групи феритів використовують для виготовлення осердь різних трансформаторів, котушок індуктивності фільтрів, магнітних антен, статорів і роторів високочастотних мікродвигунів, деталей.

3.3. Магнітотверді матеріали і їх характеристики

Магнітотверді матеріали - феромагнітні матеріали, які намагнічуються до насичення і перемагнічуються в порівняно сильних магнітних полях напруженістю $H \sim A/m$. Магнітотверді матеріали характеризуються високими значеннями коерцитивної сили $H_C \sim 10^3 - 10^6 A/m$, залишкової індукції $B_r \sim 0,5 - 15 Tл$, і максимальною щільністю магнітної енергії $(BH)_{max} \sim 10 - 10^3 кДж/м^3$.

Природа високих значень коерцитивної сили визначається одним (чи декількома) основним механізмом затримки процесів перемагнічування у феромагнетиках: безповоротним поворотом намагніченості M_s магнітних доменів; затримкою утворення або росту зародків перемагнічування; закріпленням доменних меж (стінок) на різних неоднорідностях і структурній недосконалості кристала.

За переважаючою технологічною ознакою тверді матеріали можна розділити на наступні групи:

1. Вуглецеві леговані сталі, такі, що характеризуються помірними значеннями коерцитивної сили $H_C \sim ((5 - 7) \cdot 10^3 A/m)$ і щільністю магнітної енергії $(BH)_{max} \sim (1 - 4) кДж/м^3$, що обмежує сферу їх застосування.

2. Литі сплави, що не деформуються. Їх основою є потрійні з'єднання Al - Ni - Fe з добавками кремнію, кобальту, титану, ніобію, міді. Вони мають підвищені значення $H_C \sim (10 - 60) \cdot 10^3 A/m$.

3. Залізо-кобальт-хромові, залізо-кобальт-ванадієві сплави, що деформуються, а також сплави на основі благородних металів: Pt - Co, Pd - Fe, Pt - Fe. Ці сплави зазвичай піддають пластичній деформації під тиском у поєднанні із структурним старінням або впорядкуванням. Магнітні характеристики деформованих сплавів перевищують аналогічні характеристики для недеформованих сплавів: значення $(BH)_{max}$ у них може досягати $100 кДж/м^3$.

У марках магнітотвердих сплавів букви і цифри вказують на масовий вміст відсотків: алюмінію (Д), ванадію (Ф), вольфраму (В), кобальту (К), міді (Д), молібдену (М), нікелю (Н), титану (Т). Буква А означає наявність кристалічної текстури, що покращує властивості сплаву.

4. Матеріали, що отримуються пресуванням порошків з їх подальшою термообробкою. Розрізняють металокерамічні, металопластичні матеріали; оксидні матеріали (ферити). Металокерамічні матеріали отримують з металевих порошків методом пресування без єднального матеріалу, наприклад, (Sm - Co) - самарій-кобальтові матеріали. Металопластичні матеріали отримують пресуванням порошків разом з ізолюючою зв'язкою, що полімеризується при високій температурі. З оксидних матеріалів найбільш відомий барієвий ферит (Ba - Fe - O).

Властивості основних магнітотвердих матеріали приведені в таблиці 4. До найбільш важливих застосувань магнітотвердих матеріалів відносяться постійні магніти як автономні джерела постійного магнітного поля. Зазвичай використовуються магнітотверді матеріали, що пройшли від-

повідну термічну обробку і заздалегідь намагнічені до насичення. Зазвичай постійні магніти входять як складова частина в магнітну систему, призначену для формування магнітного поля, напруженість і конфігурація якого можуть бути як постійними, так і регульованими [6, 8].

Таблиця 4

Властивості магнитотвердих феромагнітних матеріалів

Матеріал	Склад, %	H_c, кА/м	B_r, кДж/м³
Альні (ЮНД4)	15,5Al; 25Ni; 4Cu; зал. Fe	40,0	7,2
Альніко (ЮНДК24)	9Al; 14Ni; 24Co; 4Cu; 0.3Ni; зал. Fe	44,0	32
Альніко (ЮРДК25БА)	9Al; 15Ni; 25Cu; 4Cb; 0,8Nb; зал. Fe	62	52,8
Тіконал (ЮНДК35Т5БА)	7,6Al; 14Ni; 35Co; 3,5Cu; 5Ni; 0.8Nb; осТ. Fe	125	96
Вікалой 2	52 Co; 13V; зал. Fe	29,6-37,6	8-14
Куніфе 2	50Cu; 20 Ni; 2,5Co; зал. Fe	20,8	2,8-3,2
Куніко 2	35Cu; 24Ni; 41Co	36,0	4,0
Pt-Co	76Pt; 24Co	384	73,6
Fe-Co-Cr	63Fe; 25Cr; 12Co	50	61
Mn-Al-C	70Mn; 29,5Al; 0,5C	216	56
Барієвий ферит	Ba0•6Fe ₂ O ₃	116	24
Sm-Co	SmCo ₅	760	190
Sm-Co-Fe-Cu-Zr	Sm(Co, Fe, Cu, Zr) ₈	800	260
Nd-Fe-B-Co-Al	Nd ₁₅ Fe _{62.5} B _{5.5} Co ₁₆ Al ₁	880	324

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть явище провідності, використовуючи зонну теорію твердого тіла.
2. Поясніть явище провідності, використовуючи електронну теорію.
3. Запишіть диференціальну і інтегральну форми закону Ома з вказівкою усіх параметрів і їх одиниць виміру.
4. Як визначається температурний коефіцієнт питомого опору? Які межі застосовності цього співвідношення? У чому його фізичний сенс?
5. Як визначається коефіцієнт лінійного розширення провідників? Які межі застосовності цього співвідношення? У чому його фізичний сенс?
6. Проведіть порівняння основних характеристик міді і алюмінію як матеріалів з високою провідністю. Зробіть висновки про переваги і недоліки.
7. Перерахуйте види поляризації діелектриків і поясніть в кожному випадку поляризаційний механізм.
8. Що таке діелектрична проникність речовини? Наведіть приклади матеріалів з найбільшою і найменшою діелектричною проникністю? Які їх переваги і недоліки?
9. Приведіть основні типи діелектричних втрат. Як визначається струм витоку діелектрика?
10. Дайте визначення тангенс кута діелектричних втрат діелектрика. Приведіть способи його зменшення.
11. Що таке електрична міцність діелектрика і від чого вона залежить?
12. Пробій газів. Крива Пашена
13. Пробій рідких діелектриків.
14. Види пробою твердих діелектриків. Поясніть, якими процесами вони викликані?
15. На які групи здійснюється розділення діелектричних матеріалів за умовами застосування?
16. Приведіть склад і основні електроізоляційні характеристики трансформаторної оливи. Чому цей рідкий діелектрик найбільш поширений?
17. Які заходи передбачаються для продовження терміну служби трансформаторної оливи?
18. Конденсаторні оливи. Склад, властивості, характеристики, сфери застосування.
19. Фторовмісні рідкі діелектрики. Склад, властивості, характеристики, сфери застосування.
20. З якою метою в енергетиці використовуються лаки і емалі? Перерахуйте їх типи сфери застосування.
21. Структура феромагнітних речовин. Процес намагнічення феромагнетиків. Магнітне насичення. Анізотропія магнітних властивостей феромагнітних матеріалів.
22. Основна крива намагнічення феромагнітних матеріалів. Магнітна проникність: початкова, максимальна, динамічна.

23. Залежність магнітної проникності від температури. Точка Кюрі. Температурний коефіцієнт магнітної проникності.

24. Явище гістерезису при перемагнічуванні феромагнітних речовин. Граничний цикл перемагнічування і його параметри: індукція насичення, залишкова індукція, коерцитивна сила.

25. Магнітомякі і магнітотверді матеріали. Залежність магнітних властивостей матеріалів від технології обробки.

26. Втрати у феромагнітних матеріалах: види втрат, розрахунок втрат на гістерезис і втрат від вихрових струмів.

27. Магнітомякі матеріали: склад, технологія отримання, основні властивості, сфери застосування. Електротехнічна сталь. Пермалой. Альсифери.

28. Маркування електротехнічної сталі.

29. Різновиди і властивості заліза, вживаного в електротехніці.

30. Що таке конструкційні сталі? Їх склад, параметри, сфери застосування.

ДОДАТОК

Таблиця 5

Характеристики деяких металів

Матеріал	Питомий опір при 20 °С, Ом*мм ² /м	ТК С, %/°С	Температура плавлення, °С	Щільність, г/см ³
Алюміній	0,028	0,49	660	2,7
Бронза	0,1150	0,4	900	8,8
Золото	0,024	0,37	1060	19,3
Латунь	0,03...0,06	0,2	900	8,5
Мідь електро-технічна	0,0175	0,4	1080	8,9
Нікель	0,07	0,6	1450	8,8
Олово	0,115	0,42	230	7,3
Платина	0,1	0,3	1770	21,4
Свинець	0,21	0,4	330	11,4
Срібло	0,016	0,38	960	10,5
Сталь	0,098	0,62	1520	7,8
Вугілля	0,33...1,85	0,06	—	—
Хром	0,027	—	—	6,6
Цинк	0,059	0,35	420	7,0

Таблиця 6

Температурний коефіцієнт опору α 20 °С

Метал	α (10^{-3} /К)	Метал	α (10^{-3} /К)
Алюміній	4,3	Ртуть	0,92
Алюмінієвий	3,7	Срібло	3,8
Вольфрам	4,1	Константан	0,03
Золото	3,9	Манганін	0,02
Мідь	3,8	Нейзильбер	0,33
Нікель	6,5	Нікелін	0,23
Платина	3,9	Ніхром	0,25

Таблиця 7

Допустимі тривалі струмові навантаження на дроти і кабелі

Пере- різ жи- ли, S мм ²	Мідний дріт			Алюмінієвий дріт		
	Допустиме струмове навантаження при прокладенні, А					
	Відкрите прокла- дення	Прокладення в трубі		Відк- рите прокла- дення	Прокладення в трубі	
		2 жили	3 жили		2 жи- ли	3 жили
1	15	14	13	-	-	-
1,5	20	17	15	-	-	-
2,5	27	24	22	21	18	17
4,0	36	34	31	28	25	25
6,0	46	41	37	35	32	28
10	70	60	55	50	45	42
16	90	75	70	70	55	52
25	125	100	90	95	75	70
35	150	120	110	115	90	85
50	190	165	150	145	125	115
70	240	200	185	185	155	145

Таблиця 8

Одиниці вимірювання електричних величин

Назва	Позначення латинським шрифтом	Одиниці вимірювання	
		Назва	Позначення кирилицею
Напруга	U, u	Вольт	В
Електрорушійна сила	E, e	Вольт	В
Струм	I, i	Ампер	А
Опір активний	R, r	Ом	Ом
Опір реактивний	X, x	Ом	Ом
Опір повний	Z, z	Ом	Ом

Потужність активна	P	Ватт	Вт
Потужність реактивна	Q	Вольт-ампер	вар
Потужність повна	S	реактивный	ВА
Енергія	W	Вольт-ампер Ватт-секунда або джоуль	Вт*сек, Дж

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Київ 2017. – 617 с.
2. Леонтьев, В. О. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник / В. О. Леонтьєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 122 с.
3. Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник – К.: НУХТ, 2012. – 36 с.
4. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство: [підруч.] / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К.: Грамота, 2006. – 312 с
5. Фізика діелектриків: підручник / Ю. М. Поплавко; за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с.
6. Материалы электронной техники: учебное пособие / Н. С. Легостаев. — Томск: Эль Контент, 2012. — 184 с.
7. Герасимов, В. Г. Электротехнический справочник : в 4 т. / В. Г. Герасимов. – 9-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоиздат, 2007. – Т. 1: Общие вопросы. Электротехнические материалы. – 440 с.
8. Корякин-Черняк С. Л. Электротехнический справочник / Партала О. Н., Давыденко Ю. Л.. – СПб, 2009. – 464 с.
9. Марочник стали и сплавов. [Електронний ресурс]: <http://www.splav-kharkov.com/>
10. Конструкційні та функціональні матеріали: у 2 част. Навч. посібник для студ. вищ. техн. навч. закладів / В. П. Бабак та ін. – К.: Техніка, 2003. – 368 с.
11. Справочник по электротехническим материалам: в 3-х т. / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. - 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, Том 1. - 1986. - 368 с., Том 2. - 1987. - 464 с
12. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с.
13. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2007. — 535 с: ил. ISBN 978-5-06-005817-8
14. Коханівський С.П. Електроматеріалознавство з основами слюсарної справи. –К.: Урожай, 1991 – 134 с.
15. Нікулін М.В. Електроматеріалознавство. – К.: Вища школа, 1990. – 175 с.
16. Електротехнічні матеріали / М. Ф. Сагач К.: НАУ, 2000. – 87 с.
17. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.– 344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.

Додаткова література

1. ДСТУ 2843–94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.
2. ГОСТ 21515–76. Матеріали діелектричні. Терміни та визначення.
3. ГОСТ 22622–77. Матеріали напівпровідникові. Терміни та визначення основних електрофізичних параметрів.

4. ГОСТ 22265–76. Матеріали провідникові. Терміни та визначення.
5. ДСТУ 2725–94. Матеріали магнітні. Терміни та визначення.
6. ГОСТ 6581–75. Матеріали електроізоляційні рідкі. Методи електричних випробувань.
7. ГОСТ 6433.2–71. Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення електричного опору при постійній напрузі.
8. ГОСТ 6433.4–71. Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення тангенса кута діелектричних втрат і діелектричної проникності при частоті 50 Гц.
9. ГОСТ 6433.3–71. Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення електричної міцності при змінній (частоти 50 Гц) і постійній напругах.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ	4
1.1. Призначення і класифікація провідникових матеріалів	4
1.2. Електропровідність. Основне рівняння електропровідності	4
1.3. Температурний коефіцієнт питомого опору	6
1.4. Температурний коефіцієнт лінійного розширення	7
1.5. Матеріали високої провідності	7
РОЗДІЛ 2. ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	10
2.1. Призначення і класифікація електроізоляційних матеріалів	10
2.2. Основні характеристики електроізоляційних матеріалів	11
2.3. Газоподібні і рідкі діелектрики	18
2.3.1. Характеристики газоподібних діелектриків	18
2.3.2. Пробій газоподібних діелектриків	19
2.3.3. Застосування газоподібних діелектриків	23
2.3.4. Характеристики рідких діелектриків	24
2.3.5. Пробій рідких діелектриків	25
2.3.6. Вживані і перспективні рідкі діелектрики	26
2.4. Тверді діелектрики	32
2.4.1. Характеристики твердих діелектриків	32
2.4.2. Пробій твердих діелектриків	33
2.4.3. Застосування твердих діелектриків в енергетиці	38
2.4.4. Тверднучі матеріали	39
РОЗДІЛ 3. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ	41
3.1. Властивості і класифікація магнетиків	41
3.2. Магнітомякі матеріали і їх характеристики	46
3.3. Магнітотверді матеріали і їх характеристики	50
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	52
ДОДАТОК	54
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	56

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник

**Трегуб Микола Іларіонович
Рубець Андрій Миколайович
Хахула Валерій Семенович**

Редактор О.О. Грушко

Здано до складання _____ 2020. Підписано до друку „___” _____ 2020.
Формат 60x84 1/16 Ум. друк. арк. 5,0 . Тираж 50. Зам. _____ Ціна _____
РВІКВ, Сектор оперативної поліграфії БНАУ
09117, Біла Церква, Соборна площа 8/1. Тел. 33-11-01