

Діелектрики

Діелектрики це – речовини (матеріал), що погано проводить електричний струм.

В техніці використовують тверді, рідкі та газоподібні діелектрики.

Тверді діелектрики це фарфор, гума, скло і т.д.

В якості рідких діелектриків використовують трансформаторне, конденсаторне, кабельне масло.

Найчастіше в якості газоподібного діелектрика використовують повітря.

Тіла виготовлені з діелектрика називають ізоляторами.

Молекула діелектрика складається з позитивних і негативних йонів, а також електронів. Вільних електронів в діелектриках дуже мало.

На практиці діелектрики не вважається абсолютним ізолятором. Зазвичай елементарні заряди молекули діелектрика знаходяться в хаотичному тепловому коливальному русі біля центрів рівноваги. Якщо включити діелектрик в коло постійної напруги, то під дією сил електричного поля елементарні заряди молекул діелектрика перемістяться в напрямку діючих на них сил. В результаті зміщення зарядів в середині діелектрика в колі виникає короткочасний струм поляризації. Через дуже короткий час цей струм зникає.

Струм витоку цей струм може протікати через діелектрик довгий час. Діелектрик завжди має йони та вільні електрони, хоча їх дуже мало. Під дією електричного поля вони почнуть переміщатись. Величина струму витоку значно більша ніж струму поляризації. Проходячи через діелектрик струм витоку виділяє тепло.

Якщо включити діелектрик в коло змінної напруги то процес поляризації буде проходити періодично спочатку в одному напрямку, а потім в іншому й в колі виникне змінний струм. Процес який безперервно повторюється потребує затрат енергії. Періодичне переміщення в матеріалі діелектрика йонів та вільних електронів провокує виникнення струму витоку.

Характеристики діелектрика:

- питомий опір
- діелектрична проникність
- кут діелектричних втрат
- електрична міцність

Класифікація діелектричних матеріалів

Навіть найпростіша електрична схема не може бути виконана без використання провідникових і діелектричних матеріалів. У діелектричних матеріалів електропровідність практично відсутня, точніше має дуже мізерне значення порівняно з провідниковими матеріалами.

За призначенням діелектричні матеріали можна розподілити на *електроізоляційні матеріали* та *активні діелектрики*.

Основне призначення електроізоляційних матеріалів — це перешкода проходженню струму шляхами, небажаними для роботи даної електричної схеми. їх використовують для створення електричної ізоляції, що оточує струмопровідні частини електричних пристроїв і відокремлює одна від одної частини, що знаходяться під різними електричними потенціалами. Призначення електричної ізоляції — це недопущення проходження електричного струму за будь-якими небажаними шляхами, крім передбачених електричною схемою пристроїв.

Електроізоляційні матеріали використовуються, як діелектрики в електричних конденсаторах для створення певного значення його електричної ємності, а в деяких випадках для забезпечення певного виду залежності цієї ємності від температури або інших факторів.

Активні діелектрики, тобто діелектрики з керованими властивостями, не тільки створюють електричну ізоляцію (тобто виконують «пасивну» роль), але в різних пристроях використовується зміна їх параметрів під дією різних факторів. До активних діелектриків належать *сегнетоелектрики*, *п'єзоелектрики* і *електрети*. У сегнетоелектриків діелектрична проникність суттєво змінюється при зміні напруженості електричного поля і при зміні температури. П'єзоелектрики генерують електричні заряди під дією механічних напружень і, навпаки, змінюють свої розміри під дією електричного поля. *Електрети* можуть розглядатися

як електричні аналоги постійних магнітів, оскільки вони здатні тривало зберігати електричний заряд.

Електроізоляційні матеріали *за агрегатним станом* розділяються на тверді, рідкі й газоподібні. Особливу групу становлять матеріали, які тверднуть. У процесі виробництва виробів їх вводяться в ізоляцію рідкими або пластичними, але потім вони стають твердими речовинами.

За *хімічною основою* електроізоляційні матеріали поділяються на *органічні* (сполуки вуглецю з воднем, азотом, киснем і деякими іншими елементами) та *неорганічні*.

Неорганічні матеріали порівняно з органічними мають вищу нагрівостійкість. Розрізняють також *природні, штучні і синтетичні* електроізоляційні матеріали. Природні електроізоляційні матеріали — це матеріали природного походження, які використовуються без хімічної переробки. Штучні електроізоляційні матеріали одержують шляхом хімічної переробки природної сировини. Синтетичні електроізоляційні матеріали одержують методом хімічного синтезу.

Електроізоляційні матеріали важно також розділити на *полярні й неполярні* для оцінювання їхніх електричних, адгезивних властивостей, гігроскопічності та ін.

Рідкі діелектрики

Електропровідність рідких діелектриків зумовлена пере-міщенням іонів в результаті дисоціації молекул рідини і домішок, а також переміщенням заряджених частинок домішок - моліонів. Електропровідність рідких діелектриків в значній мірі залежить від їх чистоти. В якості забруднень можна розглядати воду або інші по сторонні рідини, а також різноманітні тверді частинки. Очистка рідких діелектриків від домішок суттєво підвищує їх питомий опір, однак повністю видалити домішки із рідкого діелектрика практично неможливо. Електропровідність будь-якої рідини суттєво залежить від температури. З підвищенням температури зростає рухли-вість іонів та степінь теплової дисоціації. Ці два фактори суттєво збільшують електропровідність.

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

У неполярних рідин діелектрична проникність визначається тільки електронною поляризацією. Діелектрична проникність непо-лярної рідини суттєво залежить від температури. З ростом темпе-ратури вона зменшується, наближаючись до одиниці. Це явище пояснюється зменшенням числа молекул в одиниці об'єму. Як показує досвід, діелектрична проникність неполярних рідин (кон-денсаторна та трансформаторна олива) не залежить від частоти.

У неполярних рідин, наприклад соволу, діелектрична про-никність визначається одночасно електронною та дипольною поля-ризаціями. Діелектрична проникність полярних рідин, що викори-стовуються в якості технічних діелектриків складає від 3 до 40.

В полярних рідинах поряд із втратами на електропровід-ність основне місце займають втрати, що зв'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією. Вони мають чітко виражений темпе-ратурний і частотний максимум, залежать від в'язкості рідини, так як поворот диполів у в'язкій рідині викликає втрати енергії на тертя молекул. Полярні рідини не рекомендується використовувати при високих частотах, так як вони мають підвищені діелектричні втрати.

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

Рідкі діелектрики за своїм призначенням поділяються наступним чином:

1) По хімічній природі:

а) нафтові ізоляційні оливи; б) синтетичні рідини (хлоровані вуглеводи, кремній і фторорганічні рідини, складні ефіри різних типів);

2) По специфіці застосування: а) для трансформаторів і вимикачів; б) конденсаторів; в) кабелів; г) систем циркуляції охолодження та ізоляції випрямлювальних установок, турбогенера-торів.

3) По верхній межі допустимої робочої температури: а) до 95⁰С (всі нафтові оливи); б) до 135⁰С (синтетичні вуглеводи, хлорпохідні вуглеводів, деякі ефіри кремнієвої кислоти, фосфорної та органічних кислот); в) до 200⁰С (деякі типи фторвуглеводів); г) до 250⁰С (поліфенілефірні і спеціальні поліорганосилоксани).

4) По ступені горючості: а) горючі; б) негорючі.

Вимоги до рідких діелектриків:

1. Висока електрична міцність.
2. Високий електричний опір.
3. Величина діелектричної проникності вибирається в залежності від особливості всієї системи ізоляції.
4. Діелектричні втрати - найменші.
5. Висока стабільність в умовах експлуатації і зберігання.
6. мінімальна в'язкість в діапазоні робочої температури.
7. Сумісність з твердою ізоляцією і конструкцією матеріалів.
8. Економічність застосування.
9. Для спеціальних випадків застосування - негорючих.

У якості рідких електроізоляційних матеріалів в електротехнічних пристроях застосовують мінеральні олії і синтетичні рідкі діелектрики.

Мінеральну або нафтову олію одержують у результаті східчастої перегонки і наступної обробки нафти. По характері їхнього використання» нафтові олії можуть бути розділені на три групи:

- трансформаторні олії, використовувані для силових трансформаторів у високовольтних вимикачів;
- кабельні олії, застосовувані для просочення паперової ізоляції високовольтних кабелів;
- конденсаторні олії, використовувані для просочення ізоляції конденсаторів.

У трансформаторах олія є не тільки тепловідвідним середовищем, але і головним ізоляційним матеріалом. Воно заповнює простір між витками й обмотками і тим самим підсилює ізоляцію трансформатора.

У високовольтних вимикачах олія виконує не тільки функції рідкого діелектрика, але і середовища, що гасить електричну дугу між контактами в момент відключення.

Кабельна олія має підвищену в'язкість і застосовується в суміші з каніфоллю. У результаті цього в'язкість олії підвищується і воно не перетікає в паперовій ізоляції усередині кабелю. Слід зазначити, що кабелі на робочу напругу 110 кв і вище в СРСР робляться тільки олієнаповненими.

Олії невисокої в'язкості, але особливо ретельного очищення, що володіють поліпшеними електроізоляційними характеристиками, застосовуються для просочення і заливання конденсаторів. Для цієї мети використовується більш грузлий конденсаторний вазелін.

При вивченні даної теми варто ознайомитися про хімічний склад, основними електричними і фізико-хімічними характеристиками мінеральних олій, їхніми достоїнствами і недоліками. Необхідно також розглянути способи очищення, сушіння і регенерації трансформаторної олії.

Крім нафтових олій, великою перевагою яких є їхня приступність і дешевина, знаходять застосування синтетичні рідкі електроізоляційні матеріали. Відзначимо совол - це прозора безбарвна рідина, по хімічному складі відповідна формулі $C_{12}H_5Cl_5$ (пентахлордфеніл). Електрична міцність соволу близька до міцності трансформаторної олії. Свол використовується для заливання конденсаторів. Через велику в'язкість у трансформаторах він не застосовується. Для масляних вимикачів совол також не придатний, тому що при розриві електричної дуга в ньому виділяється багато сажі. Аналогічними властивостями володіє совтол, тобто совол, розведений трихлорбензолом $C_6H_3Cl_3$. Завдяки меншій в'язкості, він може використовуватися для заливання трансформаторів. Обидва матеріали токсичні, тому при роботі з ними варто вживати заходів обережності.

Останнім часом усе більш широке застосування знаходять кремній органічні і фторорганічні з'єднання, у числі яких маються рідини.

У залежності від особливостей структури і хімічного складу розрізняють чотири основних види кремнійорганічних діелектриків: поліметілсилоксанові (ПМСР), поліетілсилоксанові (ПЕСР), поліметілфенілсилоксанові (ПМФСР), поліхлорорганосилоксанові (ПХОСР) або поліфторорганосилоксанові (ПФОСР). Кремнійорганічні діелектрики мають велику стабільність електричних і фізико-хімічних параметрів, однак вони дорогі, тому їхнє використання обмежене спеціальною технологією.

Деяке застосування знаходять зараз різні фтороутримаючі рідини: фторовуглеводороди і фторохлорвуглеводороди. Вони відрізняються великою стабільністю, не токсичні, але дуже висока вартість обмежує їхнє застосування.

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

В маслі не повинно бути води. Якщо при опусканні в пробірку з маслом розпеченого дроту роздається тріск, то це означає, що в маслі є волога і його необхідно очищати і сушити. Для визначення розчинених у воді кислот і лугів використовують реакцію водяної витяжки, яка проводиться за допомогою індикаторів, здатних різко змінити свій колір при наявності незначної кількості кислоти або луку (наприклад, водяний розчин метилоранжу).

Для видалення води масло нагрівають різними методами: струмом короткого замикання, втратами у власному баку, струмами нульової послідовності. В деяких випадках для очищення масла досить, щоб воно відстоялося у відповідній ємності у приміщенні з відносно сухим і чистим повітрям. Але найбільше поширене сушіння масла за допомогою центрифугування при температурі $40,50^{\circ}\text{C}$. При цьому масло очищується не тільки від води, а й від важких механічних домішок.

Конденсаторні оливи - об'єднана група різних діелектриків, що застосовується для просочення паперово-масляної і паперово-плівкової ізоляції конденсаторів. Найбільш розповсюджену конденсаторну оливу отримують із трансформаторної оливи шляхом більш глибокого очищення. Відрізняється від звичайних олив більшою прозорістю, меншим значенням $\text{tg}\delta$ (більш, ніж у десять разів). Касторова олива - олива рослинного походження. Основна область використання - просочення паперових конденсаторів для роботи в імпульсних умовах. Густина касторової олії $950-970\text{ кг/м}^3$, температура застигання від -10°C до -18°C . Її діелектрична проникність при 20°C складає 4,0-4,5; $\text{tg}\delta$ при 20°C дорівнює 0,01-0,03, а при 100°C $\text{tg}\delta = 0,2-0,8$; $E_{\text{пр}}$ при 20°C дорівнює 15-20 МВ/м.

Касторова олива не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті. На відміну від нафтових олив касторове не викликає набрякання звичайної гуми. Цей діелектрик відноситься до слабополярних рідких діелектриків, його питомий опір при нормальних умовах складає $10^8-10^{10}\text{ Ом}\cdot\text{м}$. 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 зменшених діелектричних втрат.

Тверді діелектрики.

Тверді діелектрики - це надзвичайно широкий клас речовин, що містить речовини з, що радикально різняться електричними, теплофізичними, механічними властивостями.

Наприклад, діелектрична проникність міняється від значення, що незначно перевищує 1, до більш ніж 50000, залежно від типу діелектриків: неполярний, полярний, сегнетоелектрик. На початку курсу приводилися визначення різних типів діелектриків. Коротенько торкнемося цих визначень стосовно до твердих діелектриків.

Неполярний діелектрик - речовина, що містить молекули з переважно ковалентним зв'язком.

Полярний діелектрик - речовина, що містить дипольні молекули або групи, або, що має іони в складі структури.

Сегнетоелектрик - речовина, що має в складі області зі спонтанною поляризацією.

Механізми поляризації в них різко різняться:

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

Усі діелектричні матеріали можна розділити на групи, використовуючи різні принципи, наприклад, розділити на неорганічні й органічні матеріали.

Неорганічні діелектрики: скла, слюда, кераміка, неорганічні плівки (окисли, нітриди, фторидів), металофосфати, електроізоляційний бетон. Особливості неорганічних діелектриків - негорючі, як правило, світло-, озono- термостійкі, мають складну технологію виготовлення. Старіння на змінній напрузі практично відсутні, схильні до старіння на постійній напрузі.

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

Застосування в енергетику:

- лінійна й підстанційна ізоляція - це порцеляна, скло й кремнійорганічна гума в підвісних ізоляторах ПЛ, порцеляна в опорних і прохідних ізоляторах, склопластики як несучі елементи, поліетилен, папір у високовольтних уведеннях, папір, полімери в силових кабелях;

- ізоляція електричних приладів - папір, гетинакс, склотекстоліт, полімери, слюдяні матеріали;

- ізоляція машин, апаратів - папір, картон, лаки, компаунди, полімери;

- конденсатори різних видів - полімерні плівки, папір, оксиди, нітриди.

Із практичної точки зору в кожному випадку вибору матеріалу електричної ізоляції слід аналізувати умови роботи й 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 виробу зі слюдяних матеріалів, деякі з яких здатні працювати до температури 700 ° С. Скла й матеріали на їхній основі (склотканини, склослюдиніти). Органосілікатні й металофосфатні покриття. Керамічні матеріали, зокрема нітрид бору. Композиції із кремнійорганіки з термостійким сполучним. З полімерів високу нагрівостійкість мають поліімід, фторопласт.

2. *Вологостійка електрична ізоляція.* Ці матеріали повинні бути гідрофобні (незмочування водою) і негігроскопічні. Яскравим представником цього класу є фторопласт. У принципі можлива гідрофобізація шляхом створення захисних покриттів.

3. *Радіаційно-стійка ізоляція.* Це, у першу чергу, неорганічні плівки, кераміка, склотекстоліт, слюдинітові матеріали, деякі види полімерів (поліімід, поліетилен).

4. *Тропостійка ізоляція.* Матеріал повинен бути гідрофобним, щоб працювати в умовах високої вологості й температури. Крім того, він повинен бути стійким проти цвілевих грибків. Кращі матеріали: фторопласт, деякі інші полімери, гірші - папір, картон.

5. *Морозостійка ізоляція.* Ця вимога характерна, в основному для гум, тому що при зниженні температури всі гуми втрачають еластичність. Найбільш морозостійка кремнійорганічна гума з фенільними групами (до -90°С).

6. *Ізоляція для роботи у вакуумі* (космос, вакуумні прилади). Для цих умов необхідно використовувати вакуумно-щільні матеріали. Придатні деякі, спеціально приготвлені керамічні матеріали, малопродатні полімери.

Полімерні матеріали.

Полімери, як правило, є гарними діелектриками. Вони мають низькі діелектричні втрати, високу питому опір, високу електричну міцність, високу технологічність і, як правило, невисокою ціною. Крім того, на основі полімерів з дисперсними добавками різної електропровідності, теплопровідності, магнітної проникності, діелектричної проникності, твердості тощо. можна одержувати різноманітні композиційні матеріали із широким спектром властивостей.

За технологічними ознаками полімерні матеріали діляться на 2 класи - термопласти та реактопласти.

Термопластичні матеріали за підвищення температури розм'якшуються, легко деформуються. Характерною рисою термопластичних матеріалів є те, що їх нагрівання не викликає необоротних змін їх властивостей. Терморективні (термозатверджуючі) матеріали (реактопласти) при нагріванні набувають необоротних змін, вони спікаються, набувають значної механічної міцності і твердості.

Термопласти – це в основному лінійні полімери, а реактопласти – це полімери із сильно розвиненою просторовою структурою.

Термопласти (термопластичні матеріали) - розм'якшуються при нагріванні, що дозволяє використовувати просту технологію термопресування. При цьому гранули вихідного полімеру поміщають у камеру термопласту - автомата, нагрівають до температури розм'якшення, пресують і прохолоджують. Так роблять дрібні діелектричні деталі. Для великогабаритних виробів, типу кабелів, напівтвердий розплав видавлюють через фільтру разом із внутрішнім електродом кабелю.

Найпоширенішим діелектриком цього класу є поліетилен $H-(CH_2)_{nh}$. Поліетилен роблять шляхом полімеризації газу етилену при підвищених тисках і температурах.

З інших термопластичних полімерів, використовуваних в енергетику у вигляді електроізоляційних плівок відзначимо поліпропілен, полівінілхлорид, лавсан.

Інші широко застосовувані на практиці полімерні ізоляційні матеріали – полістирол, полівінілхлорид, поліметилметакрилат.

Поруч унікальних властивостей має фторопласт (політетрафторетилен) – один із представників фторорганічних полімерів.

Цей матеріал називається фторлон-4 (фторопласт-4). Він хімічно інертний, не розчиняється у розчинниках, аж до температури 260 °С, абсолютно не змочується водою, не гігроскопічний.

Реактопласти (терморективні матеріали) - при нагріванні не розм'якшуються, після досягнення певної температури починаються руйнуватися. Виробу з них зазвичай роблять різними способами. Одна з найпоширеніших дешевих технологій полягає в наступному. Спершу готувати прес-порошки полімеру. Потім прес порошок засинають у прес-форму і пресують при певному тиску і температурі. При цьому виникає зчеплення між деформованими частинами, та після охолодження матеріал готовий до використання.

Можливе проведення полімеризації з вихідних компонентів у задалегідь підготовлених формах. Так роблять вироби з епоксидних полімерів, кремнійорганічної гуми.

Досить дешеві та технологічні реактопласти на основі фенолформальдегідних полімерів (бакеліт) та аміноформальдегідних полімерів.

Недоліки реактопластів: порівняно високе значення $tg \delta$, незастосовність як діелектрики нвч - техніки; неповна відтворюваність технологічних властивостей олігомерів тому що кількість епоксигруп мінлива, а це позначається на температурі й тривалості затвердіння.

З інших полімерів-реактопластів відзначимо діелектричний матеріал з високою механічною міцністю - капролон, з більшим діапазоном робочих температур (-100°С до +250°С) - полііміди та композити на їхній основі.

Поліімід — новий клас термостійких полімерів, ароматична природа молекул яких визначає їх високу міцність аж до температури розкладання, хімічну стійкість, тугоплавкість. Поліімідна плівка працездатна при 473 ° К (200 ° С) протягом декількох років,

при 573 ° К-1000 рік, при 673 ° К - до 6 годин. Короткочасно вона не руйнується навіть біля струмені плазмової горелки.

Поліімід є слабополярним середньочастотним матеріалом, оскільки його $\text{tg } \delta = 0,003$. Поліімід має підвищене вологовбирання.

Поліімід випускається в різних видах:

1. Плівка товщиною 8...100 мкм, у тому числі фольгована, призначена для гнучких друкованих плат, шлейфів та підкладок тонкоплівочних ГІС.
2. Лак ПАК, стійкий після висихання при 470...520°К, обмежено при 573°К, короткочасно при 670°К.
3. Прес-матеріал для отримання виробів гарячим пресуванням при 590°К та тиску 100 Мпа.
4. Пінопласт (пінополіімід) із щільністю 0,8...2,5 г/см⁵, що застосовується в якості тепло- та електроізоляційного матеріалу для температур 90 ... 520°К
5. Склопластик на основі поліімиду, стійкий до 670°К, та вуглепластик, що не втрачає механічної міцності при 550°К.
6. Ізоляційна стрічка, стійка за температури до 500°К.

Папір і картон

Бумаги та картон – це листові або рулонні матеріали коротковолокнистої будови, що полягають в основному з деревної целюлози. Важливим перевагою цих матеріалів є те, що вони проводяться з поновлюваного сировини, а саме з деревної маси.

Для видалення домішок, що утримуються в деревині, целюлозу обробляють хімічними реагентами. Для писального паперу деревину обробляють сірчистою кислотою H_2SO_3 , а для виготовлення паперів для електричної ізоляції, пакувальних паперів використовують лужну обробку. Лужна целюлоза не відбілюється, зберігає жовтуватий колір, обумовлений барвниками деревини.

Лужна целюлоза дорожча за сульфітну, однак у ній вихідна целюлоза зберігає більшу молекулярну масу і довжину молекул, лужний папір має більш високу механічну міцність, і більш стійка до теплового старіння. Міцність паперу сильно залежить від вологості й перезволоження, так само як і пересушена папір, мають знижену механічну міцність.

Чим вища щільність паперу, тим вища як механічна, так і електрична міцність паперу. Самі тонкі та міцні папери використовуються для виготовлення конденсаторів. Досить відзначити, що щільність конденсаторних паперів досягає 1.6 т/м³, тобто більш ніж у 1.5 рази перевищує щільність води. При цьому електрична міцність паперу завтовшки 10 мкм, просоченої трансформаторним маслом, становить до 10 кВ/мм.

Кабельний папір позначається символами ДО -кабельна, М - багатошарова, В – високовольтна, В – ущільнена цифрами від 015 до 240, що позначає товщину паперу в мікрометрах.

Бумаги марок ДО та КМ застосовуються в силових кабелях до 35кВ, КВ і КВУ 35 кВ і вище, КВМ та КВМУ – 110 кВ і вище.

У паперової ізоляції силового кабелю слабкими місцями – вогнищами розвитку пробую є зазори між окремими стрічками паперу.

Просочувальний папір уживається для виготовлення листового гетинакса.

Конденсаторний папір – у просоченому виді вона утворює діелектрик паперових конденсаторів. Тому що папір у конденсаторах працює в просоченому стані, то із практичної точки зору важливі формули, що дозволяють визначати електроізоляційні властивості просоченого паперу виходячи з властивостей паперу та просочувального складу

Картон відрізняється від паперу більшою товщиною. Виділяють два типи картонів: повітряні (більш щільні) та масляні (більш пухкі) призначені для роботи в маслонаповнених агрегатах.

Електротехнічний картон використовують як діелектричні дистанціюючі прокладки, шайби, розпірки, як ізоляцію магнітопроводів, пазову ізоляцію обертових машин і т.п. Картон, як правило, використовується після просочення трансформаторним маслом. Електрична міцність просоченого картону досягає 40-50 кВ/мм. Оскільки вона вища за міцність трансформаторної олії, для збільшення електричної міцності трансформаторів найчастіше

влаштовують у середовищі олії спеціальні бар'єри з картону. Маслобарерна ізоляція звичайно має міцність $E=30-40$ кВ/мм. Недоліком картону є гігроскопічність, внаслідок влучення вологи зменшується механічна міцність і, різко зменшується електрична міцність (у 4 і більше разів

Шарувати пластики

Широке застосування в якості конструкційних та електроізоляційних матеріалів мають шаруваті пластики — композиції, що полягають із волокнистого листового наповнювача — паперу, тканини, склотканини, просочених і склеєних між собою різними полімерними з'єднувачами. Шаруваті пластики відрізняються від інших матеріалів тим, що застосовуваний наповнювач розташовується паралельними кулями. Така структура забезпечує високі механічні характеристики, а використання полімерних сполучно-достатній високий питомий електричний опір, електричну міцність і мало значення $\text{tg}\delta$.

Залежно від матеріалу сполучного та наповнювача розрізняють кілька типів шаруватих пластиків: гетинакс, текстоліт, склотекстоліт.

Найбільш дешевий матеріал діелектричних підставок - гетинакс - має високі діелектричні властивості, знаходить широке застосування в побутовій радіоапаратурі. Гетинакс виходить шляхом гарячої пресування паперу, просоченого бакелітом. Випускається гетинакс на основі ацетилюваного паперу підвищеною вологостійкістю, що володіє, і здатної замінити склотекстоліти. Його недоліком традиційно вважається підвищене вологовбирання (1,5...2,5%) через кулі паперу або з відкритих їх торцевих зрізів, а також крізь полімерне сполучне.

Листковий гетинакс застосовується у вигляді щитів, панелей, ізоляційних перегородок у пристроях низької напруги. Існує спеціальна марка гетинакса, призначена для роботи в маслозаповненій апаратурі високої напруги. Електрична міцність гетинакса становить приблизно 20-40 кВ/мм. Шарувата структура гетинакса призводить до помітної анізотропії властивостей матеріалу. Електрична міцність повдоль шарів наповнювача в 5-8 разів нижче, ніж повдоль шарів.

Текстоліт має більш високу міцність при стисканні й ударною в'язкістю і тому використовується також у якості конструкційного матеріалу, і його випускають не тільки у вигляді аркушів, а й плит товщиною до 50 мм.

Склотекстоліти завдяки цінним властивостям наповнювача мають найбільш високу механічну міцність, теплостійкість та мінімальні вологовбирання. Вони мають кращу стабільність розмірів, а електричні властивості залишаються високі і у вологій середовищі. Внаслідок незвичайної твердості поверхні склотекстоліти зносостійкі.

Випускається кілька десятків марок склотекстолітів, призначених для різних цілей, у тому числі підвищеної нагрівостійкості, тропікостійкості, гальваностійкості, вогнестійкості з металевою сіткою. Звичайні марки фольгованого склотекстоліту облицьовані мідною фольгою товщиною 35...50 мкм, для напівадитивної технології випускається теплостійка модифікація з фольгою товщиною 5 мкм. Для тієї ж технології можна застосовувати листовий нефольгований склотекстоліт з адгезійною кулею, що володіють необмеженою життєстійкістю.

Для виготовлення ПП за адитивною технологією потрібні діелектрики з металевими вclusions, що утворюють центри кристалізації при хімічному обміненні. Для цього випускається шаруватий пластик-діелектрик, що містить мілкодисперсні частки металів - Ag або V.

Якість друкованих плат характеризується наступними властивостями.

1. Міцність є одним з основних властивостей, оскільки друковані плати виконують роль не тільки діелектричної підстави, а й несучої конструкції. Часто потрібна вібростійкість, якої, особливо при більших розмірах плат, склотекстоліт не має. Слід мати на увазі, що міцність при товщині, більшої, ніж 1,5 мм, починає знижуватися, тому що утрудняється видалення летких речовин при отвердінній позначається градієнт температури, який, як і у випадку стекла, виявляється у вигляді мікротріщин на поверхні. Це є ще одним прикладом розмірного ефекту міцності.

2. Нагрівостійкість фольгованих шаруватих пластиків визначається за відсутністю здуттів, розшаровування та відклеювання фольги, що виникають при паянні. Критерієм є година, в секундах, протягом якої руйнування не спостерігаються при нагріванні до 533 ДО (260 °С). Мінімальна нагрівостійкість – 5 з, у найкращих марок-20 с.
3. Стабільність розмірів — зміна тривалості при зміні температур у процесі паяння, коли вся плата перегрівається приблизно до 393 ДО (120°С); ТКЛР склотекстоліту при товщині 1,5 мм становить $8-10 \cdot 10^{-6}$ ДО⁻¹, тобто відрізняється від ТКЛР міді більш ніж у 2 рази, тому при більших розмірах плат можливий обрив або відшарування фольги. Крім того, при $T \sim 370^\circ\text{K}$ в епоксидних смолах спостерігається фазовий перехід, вище якого різко зростає ТКЛР у напрямку товщини шаруватого пластику, що призводить до обриву металізації отворів. Нестабільність розмірів виявляється також у вигляді неплщинності — прогину, жолоблення, скручування, що виникають внаслідок механічних напруг.
4. Електрична міцність склотекстоліту анізотропна: у поздовжньому напрямку вона у кілька разів вища, ніж у напрямку товщини. Причина цього — анізотропія самого матеріалу і наявність мікротріщин, що зменшують ефективну товщину, але не завдовжки і ширину. Зі збільшенням товщини електрична міцність падає. Так, для плат завтовшки 0.5 і 10 мм значення електричної міцності відповідно 30 і 10 кВ/мм.

Недоліки фольгованих склотекстолітів є наслідком їх неоднорідної структури та особливостей використовуваних матеріалів. Це-жолоблення, нестабільність розмірів, розтріскування, відшарування, займистість. Нарешті, склотекстоліт через високий tgδ непридатний для нвч-техніки.

Лакотканіні

Лакотканиною називається гнучкий електроізоляційний матеріал, що є тканиною, просоченою електроізоляційним лаком. Тканина забезпечує значну механічну міцність, а лакова плівка – електричну міцність матеріалу. Лакотканина застосовується для ізоляції в електричних машинах, апаратах, кабельних виробках. Як основу найчастіше застосовують бавовняні, рідше шовкові тканини. Шовкові лакотканини дорожчі, але тонші і мають більш високу електричну міцність. Лакотканини відносяться до ізоляції класу А. Останнім часом широко застосовуються й штучні тканини.

За родом лаку, що просочує, лакотканіні підрозділяються на світлі(жовті) на масляних лаках і чорні – на масляно-бітумних лаках. Світлі лакотканіні відносно стійкі до дії органічних розчинників, які мають високу схильність до теплового старіння. Їхня електрична міцність становить від 35-50 кВ/мм (хб) до 55-90 кВ/мм (шовк). Чорні лакотканіні мають кращі електроізоляційні властивості, їх електрична міцність становить 55-60 кВ/мм. Гігроскопічність чорних лакотканин значно нижча, ніж світлих.

До лакотканин слід також віднести електроізоляційні трубки, застосовувані для ізоляції та захисту вивідних кінців в електричних машинах та апаратах.