

Рідкі діелектрики, їх властивості і застосування

Діелектрики в електричному полі характеризуються такими параметрами як:

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ – властивість речовини проводити незмінний в часі електричний струм під впливом постійного електричного поля. Кількісно електропровідність характеризується питомою об'ємною провідністю та питомою поверхневою провідністю або зворотніми величинами - питомим об'ємним опором і питомим поверхневим опором.

ПОЛЯРИЗАЦІЯ – це процес у речовині, який характеризується тим, що електричний момент деякого об'єму речовини починає відрізнятися від нуля. Здатність діелектриків поляризуватися оцінюється за величиною діелектричної проникності

ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ – електрична потужність, яка розсіюється в діелектрику, що знаходиться в електричному полі.

Здатність діелектриків до діелектричних втрат характеризується тангенсом кута діелектричних втрат $\tan \delta$. **ПРОБІЙ** - явище, яке приводить до утворення каналів високої провідності.

Діелектрична проникність рідких діелектриків

Рідкі діелектрики можуть бути утворені з неполярних і полярних молекул. Залежність ϵ неполярних рідин від температури і частоти наведена на рис. 2.2.

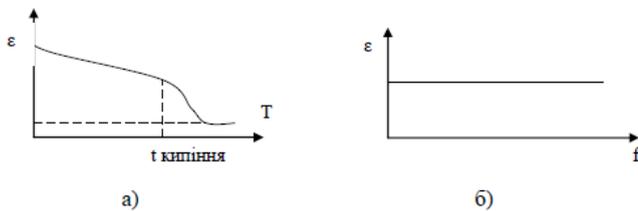


Рисунок 2.2 – Залежність ϵ неполярних рідин від температури (а) і частоти (б)

Для полярної рідини графік залежності ϵ від температури $\epsilon=f(t^\circ)$ наведений на рис. 2.3

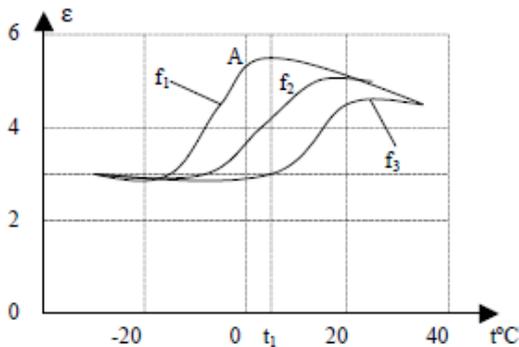


Рисунок 2.3 – Залежність діелектричної проникливості від температури для полярної рідини совола ($f_1 = 50$ Гц; $f_2 = 400$ Гц; $f_3 = 1000$ Гц)

Графік залежності ϵ полярної рідини $\epsilon=f(f)$ від частоти наведений на рис. 2.4.

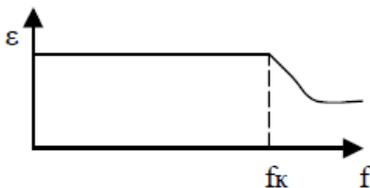


Рисунок 2.4 – Залежність діелектричної проникливості від частоти для полярної рідини

Значення критичної частоти f_k , при якій починається зниження ϵ (рис. 2.4) визначається за формулою:

$$f_k = \frac{kT}{8\pi^2 r^3 \eta}, \quad (2.12)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – стала Больцмана;

T – температура;

r – радіус молекул;

η – динамічна в'язкість речовини.

Час релаксації молекул t_k пов'язаний з частотою f_k співвідношенням:

$$f_k = \frac{1}{2\pi t_k}, \quad (2.13)$$

де t_k – час релаксації молекул.

Діелектрична проникність для неполярних і слабополярних рідин знаходиться в межах 2,1-2,3, а для полярних рідин – $\epsilon = 3,5-5$.

Електропровідність рідин

Питома електропровідність рідких діелектриків залежить від температури. Зі збільшенням температури зростає рух іонів у зв'язку зі зменшенням в'язкості, може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Обидва ці фактори підвищують провідність.

Математично питома провідність електроізоляційної рідини описується виразом:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{a}{T}}, \quad (3.8)$$

де A і a – постійні, що характеризують дану рідину.

У неширокому інтервалі температур:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (3.9)$$

де γ_0 , α – постійні величини для даної рідини;

t – температура, °С.

Для того, щоб показати залежність питомої провідності рідини від її в'язкості, користуються законом Стокса для руху кулі у в'язкому середовищі під дією постійної сили. При цьому встановлена швидкість знаходиться за формулою:

$$v = \frac{F}{6\pi r \eta}, \quad (3.10)$$

де F – сила;

r – радіус кулі;

η – динамічна в'язкість рідини.

Сила, що діє на носій заряду, викликає його направлене переміщення і визначається за формулою:

$$F = q \cdot E, \quad (3.11)$$

де q – заряд носія;

E – напруженість електричного поля.

Загальний вираз питомої провідності:

$$\gamma = n_0 \cdot q \cdot \frac{v}{E}, \quad (3.12)$$

де n_0 – концентрація носіїв заряду.

Підставляючи в (3.12) вирази (3.10) і (3.11), отримуємо:

$$\gamma = \frac{n_0 q F}{6 \pi \eta E} = \frac{n_0 q q E}{6 \pi \eta E} = \frac{n_0 q^2}{6 \pi \eta} \quad (3.13)$$

Із (3.13) отримуємо:

$$\gamma \eta = \frac{n_0 q^2}{6 \pi} \quad (3.14)$$

Формули (3.13) і (3.14) показують зв'язок електро-провідності і в'язкості рідких діелектриків.

При великих напруженостях електричного поля (порядку 10-100МВ/м), як показує досвід, струм в рідинах не підпорядковується закону Ома, що пояснюється збільшенням кількості іонів, які рухаються під впливом поля.

На рис. 3.4 показано характер залежності струму від напруженості поля в рідких діелектриках.

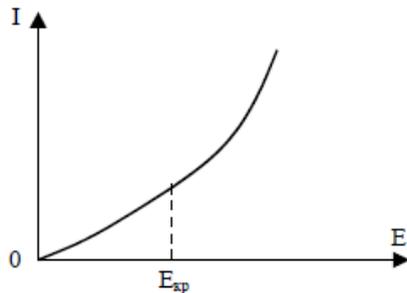


Рисунок 3.4 – Залежність струму від напруженості поля в рідких діелектриках

Для рідин високого ступеня очищення на кривій графіка можлива горизонтальна ділянка, що відповідає струму насичення (як у випадку газів).

В табл.3.1 наведені значення питомого об'ємного опору і діелектричної проникності деяких рідин при температурі 20 °С.

Таблиця 3.1 – Зіставлення значень ϵ і ρ для рідин при $t = 20$ °С

Рідина	Особливості будови	Питомий опір ρ (Ом·м)	Діелектрична проникність ϵ
Бензол	Неполярна	10^{11} - 10^{12}	2,2
Трансформаторне масло	Неполярна	10^{10} - 10^{13}	2,2
Бензин	Неполярна	10^{10} - 10^{13}	2,0
Совол	Полярна	10^8 - 10^{10}	4,5
Касторове масло	Полярна	10^8 - 10^{10}	4,6
Ацетон	Дуже полярна	10^4 - 10^5	22
Етиловий спирт	Дуже полярна	10^4 - 10^5	33
Дистильована вода	Дуже полярна	10^3 - 10^4	81

В колоїдних системах (емульсії, суспензії) спостерігаються моліонна (електрофоретична) електропровідність, при якій носіями заряду є групи молекул – моліони.

Діелектричні втрати в рідких діелектриках

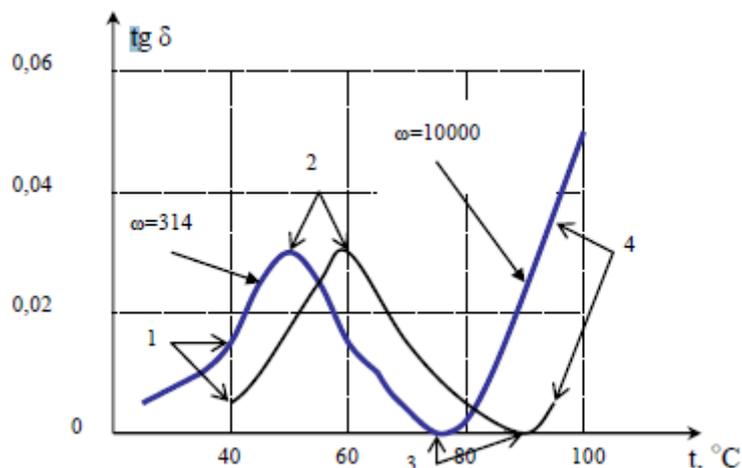
В неполярних рідинах діелектричні втрати обумовлені тільки електропровідністю, якщо рідина не має домішок з дипольними молекулами (наприклад, очищене нафтове конденсаторне масло).

Полярні рідини, наприклад совол, залежать від температури і частоти, тому можуть мати значні діелектричні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією, окрім втрат, обумовлених електропровідністю.

У техніці використовуються рідкі діелектрики, що являють собою суміші неполярних і полярних речовин (наприклад, масляно-каніфольні компаунди).

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

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



На рис. 4.4 показана залежність $\text{tg}\delta$ від t °C при різних частотах для масляно-каніфольного компаунда.

На графіках (рис. 4.4) виділено чотири області, що характеризують:

1 – якщо в'язкість речовини велика (при малих t), то молекули не встигають зорієнтуватися при змінні поля і дипольно-релаксаційна поляризація зникає ($\text{tg}\delta$ має мале значення (початок кривих));

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

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

4 – подальше зростання $\text{tg}\delta$ з підвищенням t пояснюється ростом електропровідності (за рахунок діелектричних втрат наскрізної електропровідності).

Характер залежностей потужності P_a , що розсіюється при дипольно-релаксаційних втратах у рідкому діелектрику, а також $\text{tg}\delta$ від частоти показаний на рис. 4.5:

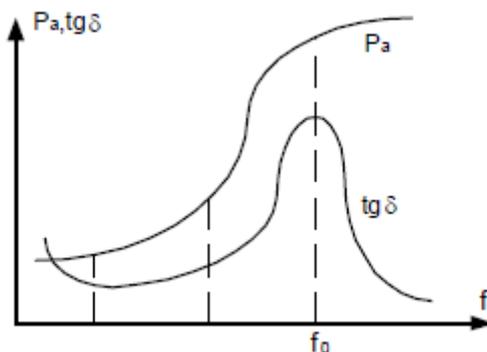


Рисунок 4.5 – Залежність P_a і $\text{tg}\delta$ від частоти для дипольної рідини

Втрати зростають з частотою доти, поки поляризація встигає слідувати за зміною поля. Коли ж частота стає настільки велика, що дипольні молекули вже не встигають орієнтуватися в напрямку

поля і $\text{tg}\delta$ падає, то втрати P_a стають постійними згідно з формулою $P_a = U^2 \omega C \text{tg}\delta$. Таким чином, характер залежності діелектричних втрат P_a від частоти не відповідає характерові частотної залежності $\text{tg}\delta$.

Дипольно-релаксаційні втрати в малов'язких рідинах при низьких частотах незначні і можуть бути менше втрат наскрізної електропровідності. Нижче для порівняння наведені значення ϵ і $\text{tg}\delta$ для неполярної і полярної рідин при частоті 50 Гц:

Трансформаторне масло $\epsilon = 2,3$; $\text{tg}\delta = 0,001$.

Совол $\epsilon = 5$; $\text{tg}\delta = 0,02$.

Як видно з вищенаведеного, тангенс кута діелектричних втрат неполярної рідини – трансформаторного масла – значно менший, ніж полярної рідини – совола.

Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються більш високою електричною міцністю, ніж газоподібні. Наявність домішок в рідких діелектриках призводить до зниження їх електричної міцності і викликає труднощі для створення точної теорії пробою цих речовин. Чисті рідкі діелектрики отримати важко. Постійними домішками є вода, гази, тверді частинки. Пробій рідин, що мають газові включення, пояснюється місцевим перегріванням рідини. Вплив води, що не змішується з трансформаторним маслом при нормальній температурі, коли вода тримається в маслі у вигляді окремих капелек, показано на рис. 5.4. Під впливом електричного поля капельки води (сильно полярної рідини) поляризуються і створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких відбувається електричний пробій.

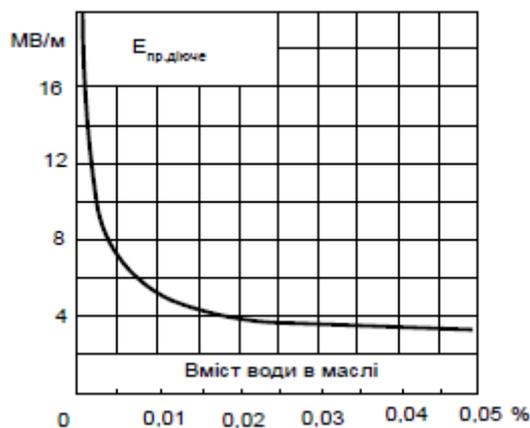


Рисунок 5.4 – Залежність електричної міцності від наявності води в трансформаторному маслі

На рисунку 5.5 показаний вплив температури на електричну міцність трансформаторного масла з домішками води.

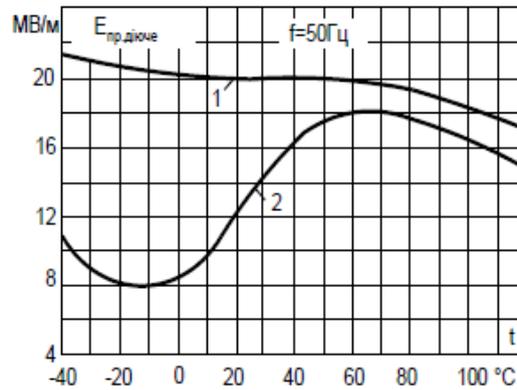


Рисунок 5.5 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури (1 – висушене масло; 2 – експлуатаційне масло)

Електрична міцність чистого масла від температури не залежить в межах до 80 °С. При 80 °С починається кипіння легких масляних фракцій і поява великої кількості кульок пару в рідині, що призводить до зниження електричної міцності. Наявність води знижує електричну міцність масла при низькій і нормальній температурі. Збільшення при підвищенні температури обумовлене переходом води зі стану емульсії в стан молекулярного розчину. Подальше зниження пояснюється процесами кипіння рідини. Збільшення електричної міцності при низьких t °С пов'язане зі збільшенням в'язкості масла і меншим значенням діелектричної проникності льоду у порівнянні з водою. Тверді забруднення (сажа, обривки волокон) спотворюють електричне поле всередині рідини і також призводять до зниження електричної міцності. Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність. Так, наприклад, неочищене трансформаторне масло має $E_{пр}$ - 4 МВ/м; після ретельного очищення електрична міцність масла підвищується до 20 – 25 МВ/м.