

ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ, ЯК ОСНОВНА ВЕЛИЧИНА
ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Капатієнко С. С., магістр, e-mail: kapatienkos@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Матеріал класифікується як «діелектрик», якщо він здатний запасати енергію під час застосування зовнішнього електричного поля. Якщо до конденсатора, що складається з двох паралельних пластин, підключити джерело постійної напруги, то конденсатор запасе більше енергії, якщо між його пластинами помістити діелектричний матеріал (порівняно з вакуумом). Діелектричний матеріал підвищує ємність конденсатора, компенсуючи заряди електродів, які в загальному випадку давали б внесок у зовнішнє поле. Ємність з діелектричним матеріалом залежить від його діелектричної проникності [1 – 2].

Якщо до конденсатора, що складається з двох паралельних пластин, підключити джерело постійної напруги V (рис. 1), то конденсатор запасе більше енергії, якщо між його пластинами помістити діелектричний матеріал (у порівнянні із вакуумом).

$$C_0 = \frac{A}{t}; \quad C = C_0 k'; \quad k' = \varepsilon'_r = \frac{C}{C_0}$$

де C і C_0 – це ємність з діелектриком і без нього, $k' = \varepsilon'_r$ – дійсна діелектрична постійна або діелектрична проникність, A і t – це площа пластин конденсатора та відстань між ними (рис. 1).

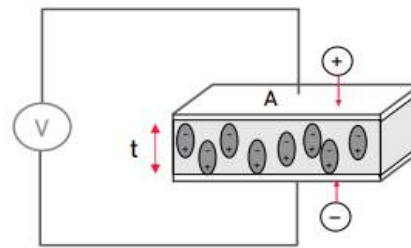


Рисунок 1 - Конденсатор із паралельних пластин, постійна напруга

Діелектричний матеріал підвищує ємність конденсатора, нейтралізуючи заряди електродів, які давали б внесок у зовнішнє поле. Ємність діелектричного матеріалу пов'язана з діелектричною проникністю через наведені вище рівняння. Якщо до того ж конденсатору підключити джерело змінної напруги V (рис. 2), то результуючий струм складається із струму перезаряду I_c і струму втрат I_l який пов'язаний з діелектричною проникністю. Втрати в матеріалі можна подати у вигляді провідності (G), включеної паралельно конденсатору (C).

$$I = I_c + I_l = V(j\omega C_0 k' + G)$$

Якщо $G = \omega C_0 k''$, то

$$I = V(j\omega C_0 k')(k' - jk'') = V(j\omega C_0)k$$

$$\omega = 2\pi f$$

де комплексна діелектрична проникність k складається із дійсної частини k' , яка представляє запас енергії, та уявної частини k'' , яка представляє втрати.

Для обчислення комплексної діелектричної проникності використовується такий вираз:

$$k = k^* = \varepsilon' \varepsilon_r^*$$

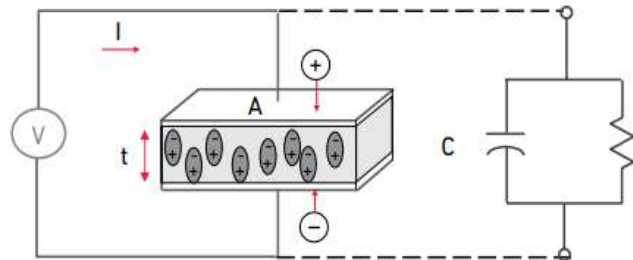


Рисунок 2 – Конденсатор із паралельних пластин, змінна напруга

З погляду електромагнітної теорії, електрична індукція (щільність просторового заряду) D_f визначається так:

$$D_f = \varepsilon E,$$

де $\varepsilon^* = \varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ – абсолютна діелектрична проникність, ε_r – відносна діелектрична проникність, $\varepsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму, E – напруженість електричного поля.

Діелектрична проникність описує взаємодію матеріалу з електричним полем E і є комплексною величиною:

$$k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r$$

Діелектрична постійна (k) еквівалентна відношій діелектричній проникності (ε_r) або відношенню абсолютної діелектричної проникності (ε) до діелектричної проникності вакууму (ε_0). Дійсна частина діелектричної проникності (ε'_r) показує, скільки енергії зовнішнього електричного поля збережено у матеріалі. Уявна частина діелектричної проникності (ε''_r) називається коефіцієнтом втрат і показує рівень розсіювання чи втрат зовнішнього електричного поля у матеріалі. Уявна частина діелектричної проникності (ε''_r) завжди більше за нуль і зазвичай набагато менше, ніж ε'_r . на коефіцієнт втрат впливають діелектричні втрати та провідність.

Якщо комплексну діелектричну проникність подати у вигляді простої векторної діаграми (рис. 3), то дійсна та уявна компоненти будуть зрушені по фазі не 90° . Сумарний вектор повернутий на кут δ щодо дійсної осі (ε'_r). Відносні втрати матеріалу визначаються ставленням втраченої енергії до запасеної.

$$tg \delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r} = D = \frac{1}{Q}$$

- Енергія,
яка витрачена за один
період/Енергія, яка має запас за один
період

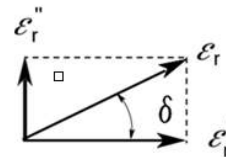


Рисунок 3 – Тангенс угла втрат

Тангенс кута втрат $tg \delta$ визначається як відношення уявної частини діелектричної проникності до дійсної. D означає коефіцієнт втрат, а Q називається добротністю. Тангенс кута втрат або $tg \delta$ називають тангенсом дельта, тангенсом кута втрат чи коефіцієнтом втрат. Іноді до матеріалів, які використовуються у НВЧ електронних приладах, застосовують термін «добротність», який є оберненою величиною від тангенса кута втрат. Для матеріалів з дуже малими втратами (оскільки $tg \delta \approx \delta$), тангенс кута втрат можна замінити самими кутом, вираженим у мілірадіанах чи мікрорадіанах.

Так для детального вивчення стану масляних діелектриків у змінному електричному полі досліджуються ε' та ε'' (ε'' - $tg \delta$) до температур і частот у даному інтервалі. Після отримання цих зв'язків можна охарактеризувати рухливість молекул у маслі, функцію розподілу часу вивільнення диполів [3].

Таким чином, діелектрична проникність ε є відносною діелектричною проникністю. Абсолютна діелектрична проникність ε (У системі СІ) є величиною ε_0 . Тут ε_0 – електричну постійну ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м) іноді називають діелектричною проникністю вакууму. У

діелектриках значення ε' та $\operatorname{tg}\delta$ вимірюються частотою яка коливається в широкому діапазоні $10^{-5} - 10^{10}$ Гц.

Безперервні вимірювання частоти зазвичай виконуються з науковою метою, але на практиці деякі вимірювання виробляються на деяких стандартних частотах контролю та оцінки діелектричних матеріалів, тобто. вимірювання при $10^{-2} - 10^{-4}$ Гц або менше дуже невеликому діапазоні частот в основному виконуються для отримання інформації про поведінку молекул, відповідальних за деформацію при тривалих напругах, процесі генерації зарядів напруги та поляризації в постійному електричному полі. На таких частотах для визначення ε' та ε'' методи мосту не підходять, оскільки стабілізація мосту займає багато часу. Тому зручно визначати заряд зразка конденсатора, вимірюючи розрядні струми та зв'язки струмів у ε' та ε'' перетворюючи в Формули Фур'є [3].

При вимірі зарядного та розрядного струмів конденсаторів, поміщаючи електроди в посудину з поверхнею S і товщиною від 0,002 до 15 мм встановлюють у вимірювальну коробку, і електроди підключаються до електрометричного підсилювача і джерела постійної напруги.

Вихід електрометричного підсилювача підключено до монітора. Зразку дається миттєва (каскадна) напруга з характерною залежністю від часу струмом. Спочатку струми швидко ростуть, а потім зі часом уповільнюються.

Після вимірювання струму протягом часу t напруга відключається і струм реєструється шляхом підключення заземлення до електрода вище.

Зарядний струм є сумою струмів полярності та провідності та визначається електричним опором струму, який є постійним у часі. Провідність може компенсувати поляризовані струми, де ε' та ε'' можуть привести до неточних результатів. Щоб уникнути цього, струм провідності повинен бути відключений від номінального струму розряду. Зазвичай струм розряду майже дорівнює струму полярності, має протилежний напрямок. Поляризована частина струму заряду вводиться в макроскопічний струм іонів ip , який може бути незворотним і відрізнятиметься від струму розряду ip . Струм провідності може бути визначено шляхом віднімання струму розряду від струму заряду. Струм можна знайти, помістивши компонент полярності $i(t)$ (або струм розряду) до ряду Фур'є.

$$i(t) = a_0 / 2 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots a_n \cos n\omega t + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots b_n \sin \omega t,$$

де a_1, a_2, \dots, a_n мають значення $\varepsilon''(\omega), \varepsilon''(2\omega), \dots, \varepsilon''(n\omega)$ та b_1, b_2, b_3, b_n мають значення $\varepsilon'(\omega), \varepsilon'(2\omega), \dots, \varepsilon'(n\omega)$ Для кожного ω значення ε' та ε'' визначається по формулі Фур'є.

$$\varepsilon' = \left(\frac{1}{\varepsilon_0 E} \right) \int_0^\infty i \cos \omega t dt; \quad \varepsilon'' = \left(\frac{1}{\varepsilon_0 E} \right) \int_0^\infty i \sin \omega t dt.$$

Частота визначається по формулі: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$,

де f – частота, t – час, вимірний від початку заряду. Діелектрична втрата визначається знаходженням обох величин.

Висновок. Очевидно, діелектричні втрати мало змінюються у діапазоні частот $10^1 - 10^3$ Гц. Значення становить $\operatorname{tg}\delta \approx 1,7$. Це вказує на те, що новий зразок трансформаторної олії TRM-AA відповідає діелектричних втрат звичайних стандартних трансформаторних олій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. High-k Gate Dielectrics / Michel Houssa. – CRC Press, 2004. – 601 p. – (Series in Material Science and Engineering). – ISBN 0750309067.
2. Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan Vijay K. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization. – New York: Wiley, 2004. 549 p.
3. Способ измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь трансформаторного масла / Абдуназаров Ахлиддин Абдурашитович, Хамидов Босит Набиевич, Кучкаров Хошимжон Ортикович. Коллоидная химия. № 10 (64), Октябрь, 2019 г. ХИМИЯ и БИОЛОГИЯ. UNIVERSIUM