

МОНІТОРИНГ ЗВОЛОЖЕНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ОЛИВИ МЕТОДАМИ ЧАСТОТНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ТА РЕФРАКТОМЕТРІЇ

Г. В. Безпрозванних, В. І. Мошенський, Д. О. Сіятовський

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Детальний аналіз впливу режимів відмови та критичності силових трансформаторів доводить, що пошкодження ізоляції є значною причиною їх відмови [1]. При цьому 75% відмов виникають через деградацію трансформаторної оливи, яка виконує функції охолодження, гасіння дуги та електричної ізоляції. Трансформаторна олива, як і будь-який діелектрик, діє як носій інформації, надаючи діагностичну інформацію як про свій стан, так і технічний стан трансформатора у цілому.

Техніка діелектричної спектроскопії в частотній області розглядається як перспективний інструментарій для виявлення вологи у силових трансформаторах [2] – [3] та широко використовується для виявлення, наприклад, водяних тріантів в твердій полімерній ізоляції силових кабелів, зволоженості композитної терморезистивної ізоляції електричних машин [4].

Зволоження діелектрика, так само як і інші чинники, призводить до змінення діелектричного відклику в частотній області, тобто до змінення комплексної діелектричної проникності ε^* від циклічної частоти $\omega=2\pi f$ [5]:

$$\varepsilon \cdot (\omega) = \varepsilon' \cdot (\omega) - j\varepsilon'' \cdot (\omega), \quad \operatorname{tg}\delta = (\gamma + \omega\varepsilon''\varepsilon_0) / \omega\varepsilon'\varepsilon_0, \quad (1)$$

де: ε' – дійсна частина комплексної діелектричної проникності (визначає електричну ємність діелектрика); ε'' – уявна частина (визначає втрати електричної енергії в діелектрику); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; γ – питома провідність діелектрика, См/м; $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат (визначає втрати на електропровідність та поляризацію).

У неполярних рідинах, до яких відноситься трансформаторна олива, електропровідність обумовлена наявністю дисоційованих домішок, особливо вологи. Питома провідність та вміст вологи у високоякісній трансформаторній оливі не перевищують 3 пСм/м та 2,2% відповідно [3].

Сучасні цифрові прилади дозволяють вимірювати електричну ємність, $\operatorname{tg}\delta$ у широкому діапазоні частоти в області слабких електричних полів для зменшення нелінійного відгуку на діелектричні параметри з виявленням вологи за отриманими результатами.

На рис.1 представлено експериментальні залежності електричної ємності C (рис. 1,а), $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 1,б) та визначених значень діелектричної проникності (рис. 1,в) за результатами вимірювань C та відомих геометричних розмірів циліндричних електродів вимірювальної комірки з досліджуваними рідкими діелектриками. Крива 1 відповідає зволоженій рідині, крива 2 – з меншим вмістом вологи. Значення діелектричної проникності для частоти 100 Гц надає підстави оцінити перевищення вмісту вологи у зразку 1 відповідно до теорії поляризації Максвелла-Вагнера: у зразку 1 на 26% більше, ніж у зразку 2.

Вода, як сильно полярний діелектрик, обумовлює нелінійну залежність C та ε' в діапазоні проведених вимірювань з проявом характерного дипольно-

го максимуму $\operatorname{tg}\delta$ в діапазоні частоти 500 кГц (рис.1,б). Точками на кривих 1 та 2 рис. 1,а,б показані експериментальні значення. Суцільні криві для $\operatorname{tg}\delta$ відповідають апроксимації поліномом 2-о ступеню. Зменшення діелектричних втрат в діапазоні частоти від 100 Гц до 100 кГц обумовлено процесами електропровідності в трансформаторній оливі. Для зволоженого зразка (крива 1, рис.1,б) відмічаються більші значення $\operatorname{tg}\delta$, що пов'язано з більшим вмістом води.

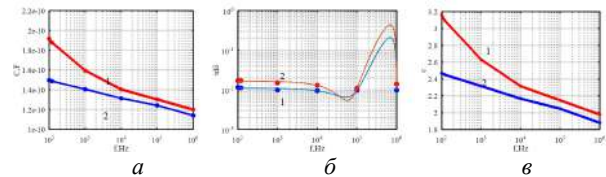


Рис.1 Динаміка змінення діелектричних параметрів трансформаторної оливи у широкому діапазоні частоти

Додатково проведено дослідження визначення показника заломлення трансформаторної оливи рефрактометричним методом за допомогою рефрактометра [5]. Вимірювання виконано у білому прохідному світлі. Значення показників заломлення становлять 1,452 та 1,512 для зразків 2 та 1 відповідно. Показник заломлення трансформаторної оливи не повинен перевищувати значення 1,505, для конденсаторного – 1,479. Отримані результати у оптичному діапазоні підтверджують зволоженість трансформаторної оливи зразка 1.

Таким чином, діелектрична спектроскопія у широкому діапазоні частоти (від звукового до оптичного) є ефективним інструментарієм виявлення вологи у трансформаторній оливі.

Список літератури

- [1] Beheshti Asl M., Fofana I., Meghnefi F. Review of Various Sensor Technologies in Monitoring the Condition of Power Transformers. *Energies*, 2024, issue 17(14), p. 3533. doi: <https://doi.org/10.3390/en17143533>
- [2] Raetzke S., Koch M., Krueger M., Talib A. Condition assessment of instrument transformers using dielectric response analysis. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/s00502-012-0112-2>
- [3] Gutten M., Korenciak D., Konarik R., Kanuch J. Comparative Analysis of Distribution Transformers with Varying Ratings and Insulation States via Frequency Domain Spectroscopy and Capacitance Ratio. *Applied Sciences*, 2025, issue 15(9), p. 4715. doi: <https://doi.org/10.3390/app15094715>
- [4] Безпрозванних Г.В., Рогинський О.В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин. Монографія, 2023, Харків, 192 с.
- [5] Безпрозванних Г.В., Кессаев О.Г., Москвітін Є.С. *Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика діелектриків» для студентів денної та заочної форми навчання*. Харків: НТУ «ХПІ». – 2024. – 100 с.