

ДІЕЛЬКОМЕТРІЯ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Ї Роман Івах, Богдан Стадник, Тарас Домінюк, 2014

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглянуто розділ такої галузі метрології, як діелектрометрія, проаналізовано її фізичні підстави, а також сучасний стан та перспективи. Розглянуто коло питань застосування діелектричних вимірювань, оцінено їх переваги та недоліки, запропоновано шляхи розвитку діелектрометрії.

Статья посвящена разделу такой области метрологии, как диэлектриметрия, проанализированы ее физические основания, а также современное состояние и перспективы. Рассмотрен круг вопросов применения диэлектрических измерений, оценено их преимущества и недостатки, предложены пути развития диэлектриметрии.

Section of this article is devoted to the field of metrology as dielectrometry analyzed its physical base, as well as the current state and prospects. We consider a range of issues the use of dielectric measurements, assessed their strengths and weaknesses, the ways of dielectrometry.

Вступ. Дослідження діелектричних властивостей матеріалів (рідких, твердих, сипких тощо) є однією з найфундаментальніших і складних проблем науки, що має велике теоретичне та практичне значення, оскільки точні вимірювання цих властивостей можуть забезпечити вчених та інженерів важливою інформацією, яка дасть змогу належно визначити передбачувану сферу застосування матеріалу для підвищення надійності конструкцій або для спостереження за процесом виробництва з метою покращення якості [1].

До найважливіших діелектричних властивостей матеріалів найчастіше зараховують діелектричну проникність, діелектричну сприйнятливість та діелектричні втрати.

Сукупність методів кількісного визначення речовини та дослідження її молекулярної структури, які ґрунтуються на вимірюванні діелектричної проникності ϵ і тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, прийнято називати *діелектрометрією* (діелектрометрією) (від грец. *diá* – через, англ. *electric* – електричний та *metros* – вимірювання) [2, 3].

Діелектрометрія охоплює різноманітні методи аналізу, які найчастіше зводяться до вимірювання діелектричної проникності речовини, що, як правило, зумовлено орієнтацією в електричному полі частинок (молекул, іонів з дипольним моментом) [4].

Метою дослідження є аналіз сучасного стану та огляд галузей застосування діелектричних вимірювань

та окреслення шляхів розвитку діелектрометрії. Враховуючи переваги та недоліки діелектрометрії, розширити перелік об'єктів дослідження, діапазонів частот та інтервалів температур для вимірювання діелектричних властивостей матеріалів.

Сучасний стан галузі. Основою для використання методів діелектрометрії були праці німецького фізика Пауля Друде (1897) та праці нідерландського фізико-хіміка, лауреата Нобелівської премії з хімії за 1936 рік, Петера Дебая (1925–1929). До доробку Пауля Друде належать розроблення теорії електро- та теплопровідності металів, він вперше виявив і пояснив аномальну дисперсію діелектричної проникності, запропонував методи вимірювання діелектричної проникності та показника поглинання рідких діелектриків в метровому та дециметровому діапазонах електромагнітних хвиль, встановив емпіричний зв'язок між будовою молекул та діелектричними втратами [5]. Петер Дебай встановив зв'язок між діелектричною проникністю та діелектричними втратами із будовою молекул [6]. Однак методи вимірювання діелектричної проникності почали використовувати на практиці значно пізніше, коли з'явилися достатньо прості та зручні прилади для вимірювання діелектричної проникності.

Одним з перших, хто аналітично довів перспективність застосування діелектричних вимірювань для задачі визначення вологовмісту твердих тіл, був

Марк Берлінер (1929 р.) [7]. Вже згодом були розроблені методи визначення чистоти органічних сполук та аналізу бінарних органічних систем. А в 1950–1960 рр. вперше були опубліковані методи діелькометричного титрування органічних систем. Варто зазначити, що методи діелькометрії розроблені, як правило, для аналізу непровідних або низькопровідних органічних систем, що не вичерпує усіх можливостей діелькометрії.

Отже, відносна діелектрична проникність ε визначається як відношення ємності конденсатора C , діелектриком у якому є досліджуваний матеріал, до ємності конденсатора C_0 , діелектриком у якому є вакуум:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (1)$$

Як видно зі співвідношення (1), відносна діелектрична проникність є величиною безрозмірною і не залежить від вибору системи одиниць.

Для безповітряного простору $\varepsilon = 1$, для повітря $\varepsilon = 1,0006$, для усіх інших матеріалів $\varepsilon > 1$ [8]. Це визначення можна певною мірою перефразувати: у разі внесення досліджуваного діелектричного матеріалу між електродами конденсатора його ємність збільшується в ε разів.

На відміну від відносної діелектричної проникності, абсолютна діелектрична проникність ε_a має розмірність $[\text{Ф}\cdot\text{м}^{-1}]$. Між абсолютною та відотною діелектричною проникністю існує така залежність:

$$\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0, \quad (2)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму [9]:

$$\varepsilon_0 = 10^7 / 4\pi c^2 [\text{Ф}\cdot\text{м}^{-1}] = 8,85 \cdot 10^{-12} [\text{Ф}\cdot\text{м}^{-1}],$$

де c – швидкість світла у вакуумі ($c = 2,998 \cdot 10^8 [\text{м}\cdot\text{с}^{-1}]$).

Галузі застосування діелькометрії доволі різноманітні. Найчастіше діелектричні методи використовують для вимірювання вологості різних хімічних сполук [10, 11]: мінеральних, рослинних та тваринних жирів [12]; вологих сільськогосподарських продуктів (трави, силосу, зерна тощо); чаю, тютюну [13, 14], м'яса, молока і хліба [15]; дерева, піску, глини, вугілля, гуми; вмісту компонентів різних гетерогенних систем, зокрема, для визначення коефіцієнта армування композитних матеріалів [16]. Наявність вологи спричиняє значну поляризацію неоднорідних багатокомпонентних діелектриків, якими і є досліджувані матеріали [17].

Важливою сферою використання діелькометрії є аналіз сумішей [18], газів, виявлення неоднорідності [19]; радіогеологія [20], що досліджує та аналізує неоднорідність ґрунту; виявлення сторонніх включень

у матеріалах (наприклад, цвяхи в дереві) та безліч подібних застосувань.

Також привертає увагу науковців проблема взаємодії електромагнітних полів із живими організмами та можливість застосування діелектричних вимірювань у медицині, особливо під час дистанційного визначення структури біологічного об'єкта, моделювання штучних об'єктів з електродинамічними характеристиками, максимально наближеними до характеристик реальних біологічних об'єктів [21].

Вимірювання діелектричних властивостей матеріалів може дати інформацію про параметри, які є критичними під час проектування багатьох елементів електроніки. Наприклад, втрати в ізоляції кабелю, імпеданс підкладки або частота діелектричного резонатора можуть залежати від їхніх діелектричних властивостей. Така інформація використовується також для покращення властивостей феритів, поглиначів, а також схем компонування.

Знання діелектричних властивостей матеріалів дають перспективи розвитку діелькометрії у сфері промислової мікрохвильової обробки продуктів харчування, гуми, пластику та кераміки.

Переваги діелькометричних методів такі:

- однозначність залежності між вхідною та вихідною величинами, зазвичай без гістерезису;
- простота і технологічність конструкції, зручність монтажу та експлуатації;
- простота адаптації форми конденсатора до вимірювання різних неелектричних величин;
- односпрямованість дії, тобто навантаження вихідного кола не чинить ніякого впливу на вимірювану неелектричну величину;
- велика переважувальна здатність;
- мала стала часу, що уможливило вимірювання в динамічному режимі;
- можливість виготовлення конденсатора з високою точністю та малими втратами;
- можливість отримання інформації про параметри досліджуваного матеріалу як у великих об'ємах матеріалу, так і у його локальних ділянках та на певній глибині.

Беззаперечними перевагами діелькометрії є також значно нижчий рівень шумів порівняно з резистивними та індуктивними методами, а також відсутність самонагрівання.

Основними недоліками, що обмежують застосування діелькометричних методів, є порівняно незначні значення ємності конденсаторів, що викорис-

товуються як первинні перетворювачі, вплив на значення ємності температури довкілля, вологості повітря чи діелектрика, а також інших зовнішніх факторів. Водночас температуру, положення, вібрації та інші впливні фактори здебільшого можна якщо не виключити, то хоча б істотно зменшити, оптимізуючи конструкцію перетворювачів.

Відповідно, перспективи розвитку дієлькометрії повинні спрямовуватися на розширення діапазону вимірювання діелектричної проникності; оптимізацію вибору частотного діапазону; створення математичного алгоритму або зміну конструкції первинного перетворювача для зменшення чи усунення впливу температури, вібрації, тиску, гранулометричного складу тощо на результат вимірювання; удосконалення конструкцій первинного перетворювача, а також проектування вимірювальних схем, які б давали змогу вимірювати діелектричні параметри матеріалів з необхідною для конкретного випадку точністю.

Висновки. Дослідження діелектричних властивостей матеріалів є важливою науковою та прикладною задачею. Дієлькометрія дає змогу отримати інформацію про будову матеріалів та їхню симетрію, форму та геометричні розміри, вміст вологи у різноманітних середовищах, а також структурні зміни, що проходять під дією зовнішніх факторів.

Діелектричні параметри матеріалів становлять інтерес для широкого кола фахівців, що працюють у різних галузях фізики, хімії, біології, медицини тощо. Знання діелектричних властивостей матеріалів необхідне, це важливо для розроблення низки радіотехнічних систем, розвитку методів аналізу та контролю хімічного складу, а також вирішення інших сьогоденних практичних проблем промисловості.

Можливості сучасної процесорної техніки дають змогу автоматизувати проведення експерименту, розробляти новітні методи вимірювання діелектричних параметрів, підвищувати точність вимірювання та розробити систему оцінки достовірності даних про діелектричні властивості матеріалів.

Розвиток експериментальних методів вимірювання діелектричних властивостей може істотно розширити перелік об'єктів дослідження, діапазонів частот та інтервалів температур.

1. *Основы измерения диэлектрических свойств материалов: Заметки по применению.* – Agilent Technologies, 2010. – 32 с. 2. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1456.html>. 3. Луцик Я.Т. Енциклопедія тер-

мометрії / Луцик Я.Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2003. – 428 с. 4. Лопатин Б.А. *Теоретические основы электрохимических методов анализа: учеб. пособие для ун-в.* – М.: Высшая школа, 1975. – 295 с. 5. http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom3/ch6/texthtml/ch6_4.htm. 6. Гусев Ю.А. *Основы диэлектрической спектроскопии: учебн. пособие.* – Казань, 2008. – 112 с. 7. Берлинер М. А. *Измерения влажности.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с. 8. Форейт И. *Емкостные датчики неэлектрических величин / пер. с чешского В.И. Дмитриева.* – М.–Л.: Энергия, 1966. 9. http://uk.wikipedia.org/wiki/Діелектрична_проникність_вакууму. 10. Бланк Т.А., Экспериандова Л.П., Сидлецкий О.Ц., Касян Н.А., Острась К. С. *Диэлькометрия как один из методов практической акваметрии функциональных материалов // Методы и объекты химического анализа.* – 2007. – Т. 2, № 2. – С. 156–161. 11. Ничуговский Г.Ф. *Определение влажности химических веществ.* – Л.: Химия, 1977. – 200 с. 12. Секанов Ю.П., Тамиров Л.П. *Автоматизация и приборное оснащение технологических процессов в растениеводстве.* – М.: АИ 1986. – 141 с. 13. Лыков А.В. *Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности.* – М.: ГИТТЛ, 1964. – 344 с. 14. Бензарь В. К. *Техника СВЧ-влажнометрии.* – Мн., 1974. 15. Лисовский В. В. *Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов.* – Мн., 2005. 16. Плинер Ю.Л., Свечникова Е.А., Огурцов В.П. *Управление качеством химического анализа в металлургии.* – М.: Металлургия, 1979. – 208 с. 17. Бланк Т.А., Экспериандова Л.П., Острась К.С. *Некоторые аспекты определения воды по методу К. Фишера // Журн. аналит. химии.* – 62, № 2. – С. 213–219. 18. Руднев В.А., Карножицкий П.В. *Применение метода диэлектрометрии при экспертном исследовании нефтепродуктов // Вісник Харківського національного університету. Хімія.* – 2009. – № 870. – Вип. 17(40). – С. 172–177. 19. Костромин В.В., Романов Б.С. *Диэлькометрия: прошлое и настоящее // Кабель-News.* – № 6–7. – Июнь-июль 2009. – 92 с. 20. *Измерения в промышленности: справ. изд. В 3-х кн. Кн.2. Способы измерения и аппаратура / пер. с нем. / под ред. П. Профоса.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с. 21. Манойлов В.П., Назарчук Л.Ю. *Визначення діелектричної проникності біологічного середовища на основі двошарової плоскої моделі // Наукові праці ВНТУ.* – 2012. – № 3.