

## ДІЕЛЬКОМЕТРІЯ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

© Роман Івах, Богдан Стадник, Тарас Домінюк, 2014

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Інформаційно-вимірювальні технології”,  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Стаття присвячена розділу 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 диелектрометрия, проанализированы ее физические основания, а также современное состояние и перспективы. Рассмотрен круг вопросов применения диелектрических измерений, оценено их преимущества и недостатки, предложены пути развития диелектрометрии.*

*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 дозволить належним чином визначити передбачувану область застосування матеріалу для підвищення надійності конструкцій або для спостереження за процесом виробництва з метою покращення якості [1].

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

Сукупність методів кількісного визначення речовини та дослідження її молекулярної структури, які ґрунтуються на вимірюванні діелектричної проникності  $\epsilon$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\tan\delta$ , 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 розробка теорії електро- та теплопровідності металів, 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], У свою чергу Петер Дебай

встановив зв'язок між діелектричною проникністю та діелектричними втратами із будовою молекул [6]. Однак методи вимірювання діелектричної проникності почали використовуватися 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 було розроблено ряд методів 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 низько провідних органічних систем, що не вичерпує усіх можливостей діелькометрії.

Отже, відносна діелектрична проникність  $\varepsilon$  визначається як відношення ємності конденсатора  $C$ , діелектриком у якого є досліджуваний матеріал, до ємності конденсатора  $C_0$ , діелектриком у якого 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: при внесенні досліджуваного діелектричного матеріалу між електродами конденсатора його ємність збільшується в  $\varepsilon$  разів.

На відміну від відносної діелектричної проникності, абсолютна діелектрична проникність  $\varepsilon_a$  має розмірність  $[\Phi \cdot m^{-1}]$ . Між абсолютною та відносною діелектричною проникністю існує наступна залежність:

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

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму[9]:

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

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі ( $c = 2,998 \cdot 10^8$  [м·сек<sup>-1</sup>]).

**Галузі застосування діелькометрії** досить різноманітні. Найчастіше діелектричні методи використовуються 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], де досліджується та аналізується неоднорідність ґрунту; виявлення сторонніх включень в 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, що максимально наближені 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 в сфері промислової мікрохвильової обробки продуктів харчування, гуми, пластику та кераміки.

#### **Перевагами дієлькометричних методів є:**

- 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 перевантажувальна здатність;
- мала стала часу, що дозволяє проводити 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 дієлькометрії є також значно нижчий рівень шумів порівняно з резистивними та індуктивними методами, а також відсутність самонагрівання.

**Основними недоліками**, що обмежують застосування дієлькометричних методів, є відносно незначні значення ємності конденсаторів, що використовуються як первинні перетворювачі, вплив на значення ємності температури довкілля, вологості повітря чи діелектрика, а також інших зовнішніх факторів. У той же час температуру, положення, вібрації та інші впливні фактори, у більшості випадків можна якщо не виключити то суттєво зменшити шляхом оптимізації конструкції перетворювачів.

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

**Висновки.** Дослідження діелектричних властивостей матеріалів є важливою науковою та прикладною задачею. Дієлькометрія дозволяє отримати інформацію про будову матеріалу та їхньої симетрії, форму та геометричні розміри, вміст води 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 необхідно є важливим для розроблення низки радіотехнічних систем, розвитку методів аналізу та контролю хімічного складу, а також вирішення низки інших практичних проблем сьогодення промисловості.

Можливості сучасної процесорної техніки дозволяють 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 значно розширити перелік об'єктів дослідження, діапазонів частот та інтервалів температур.

#### **Література**

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., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. *Енциклопедія термометрії.* — Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2003. – 428 с.

4. Лопатин Б. А. Теоретические основы электрохимических методов анализа: Учеб. пособие для ун-тов. – М., «Высшая школа», 1975. – 295 с.
5. [http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom3/ch6/texthtml/ch6\\_4.htm](http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom3/ch6/texthtml/ch6_4.htm)
6. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: Учебное пособие. – Казань, 2008. – 112 с.
7. Берлинер М. А. Измерения влажности. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
8. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин / Перевод с чешского В. И. Дмитриева. Москва–Ленинград: Энергия, 1966.
9. [http://uk.wikipedia.org/wiki/Діелектрична\\_проникність\\_вакууму](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. – 141с.
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. 2009. №870. Хімія. Вип. 17(40) – 172–177 с.
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. Профоса П. 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.