



УДК 631.371

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІООб'ЄКТІВ

Борохов І. В., к.т.н.,

Федюшко Ю. М., д.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел.: (0619)42-11-74

**Анотація** – стаття присвячена аналізу сучасних методів та засобів дистанційного вимірювання діелектричних властивостей біологічних об'єктів у вільному просторі. Приведені структурні схеми виміру діелектричної проникності методом вільного простору з використанням вимірювальної лінії та рефлектометра для проведення замірів у вільному просторі.

**Ключові слова** – діелектрична проникність, метод вільного простору, біологічний об'єкт, діелектричні властивості.

*Постановка проблеми.* Вимірювання діелектричної проникності матеріалів і біологічних речовин є методологічно першим і основним завданням в області контролю складу і властивостей матеріалів і біологічних речовин. Крім того, вимір діелектричних параметрів, що несе інформацію про фізичні і біофізичні властивості речовини і їх залежності від різних фізичних чинників в широкій смузі частот, вимагає проведення аналізу існуючих методів і засобів виміру.

Сучасні методи і засоби вимірів діелектричної проникності за нормальних умов і в умовах зовнішніх дій, ґрунтуються на властивостях будь-якої речовини до взаємодії з ЕМП [1...5].

Методи виміру електрофізичних властивостей речовин в НВЧ діапазоні можна розділити на методи виміру в об'ємному резонаторі, в лінії передачі та у вільному просторі.

Для наукових досліджень і практичних робіт в різних сферах, в тому числі й в сільському господарстві, значну цінність представляють виміри діелектричної проникності біооб'єктів у вільному просторі, зважаючи на відсутність фізичного збурення, яке вноситься в досліджуваний об'єкт при підготовці зразка до проведення вимірів.

*Аналіз попередніх досліджень.* Існуючі нині інформаційно-вимірювальні системи дистанційного виміру діелектричної проникності об'єктів в НВЧ діапазоні розділяються на дві основні підгрупи: вимірювачі на основі аналізу стоячої хвилі і аналізу відношення сигналів падаючого, який пройшов і відбився від досліджуваного об'єкту. Методи виміру, ґрунтовані на застосуванні вимірювальних ліній призначені для виміру характеристик стоячих хвиль, що виникають в результаті суперпозиції падаючої  $U_{ПАД}$  і відбитої  $U_{ОТР}$  хвиль уздовж лінії передачі. Відношення між  $U_{ОТР}$  і  $U_{ПАД}$  характеризуються коефіцієнтом відображення або коефіцієнтом стоячої хвилі [1].

За вимірними характеристиками стоячих хвиль можуть бути розраховані модуль і фаза коефіцієнтів відображення, втрати чотириполюсника, довжина хвилі, частота, параметри середовища (діелектриків).

*Формулювання цілей статті.* Метою статті є аналіз сучасних методів та засобів дистанційного вимірювання діелектричних властивостей біологічних об'єктів у вільному просторі з метою обґрунтування оптимального методу їх вимірювання.

*Основна частина.* Зазвичай у вільному просторі, методом вимірювальної лінії вимірюється діелектрична проникність плоских листів діелектрика з малими втратами [2]. При дослідженні листових матеріалів з малими втратами вимірюється лише фаза коефіцієнту проходження плоскої лінійно поляризованої хвилі через шар діелектрика (рис. 1).

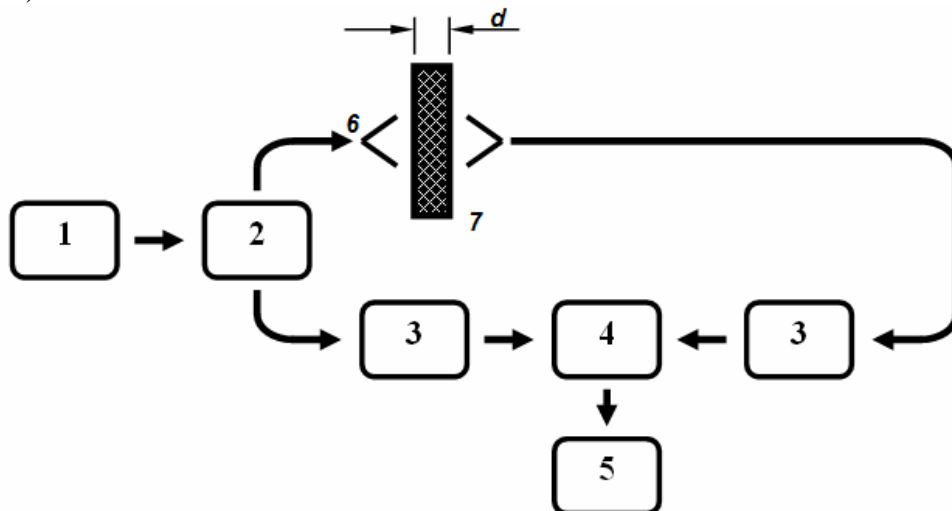


Рис. 1. Структурна схема виміру діелектричної проникності методом вільного простору з використанням вимірювальної лінії: 1 - генератор; 2 - розгалужувач; 3 - розв'язуючі атенюатори; 4 - вимірювальна лінія; 5 - індикатор; 6 - передавальна і приймальні антени; 7 - зразок діелектрика товщиною  $d$ .

При вимірюванні фази коефіцієнта проходження, лист діелектрика розміщується між передавальною і приймальною антенами вимірювальної установки.

Набіг фази вимірюється за допомогою вимірювальної лінії, ввікненої в канал опорного сигналу, як це показано на рис.1.

Фазовий набіг при цьому визначається

$$\arg T - \frac{2\pi d}{\lambda_0} = 2 \frac{2\pi}{\lambda_B} \Delta Z, \quad (1)$$

де  $\lambda_B$  – довжина хвилі у вимірювальній лінії,  
 $\Delta Z$  – зміщення мінімуму стоячої хвилі,  
 $d$  – товщина діелектрика,  
 $T$  – коефіцієнт проходження.

Слід зазначити, що методу стоячої хвилі властиві такі недоліки: вимір тільки на фіксованій частоті; вузькополосність; складність автоматизації процесу вимірів.

При дослідженнях по методу вимірів, ґрунтованому на аналізі відношення падаючого сигналу, який пройшов і відбився від досліджуваного об'єкту, використовують рефлектометри (рис. 2).

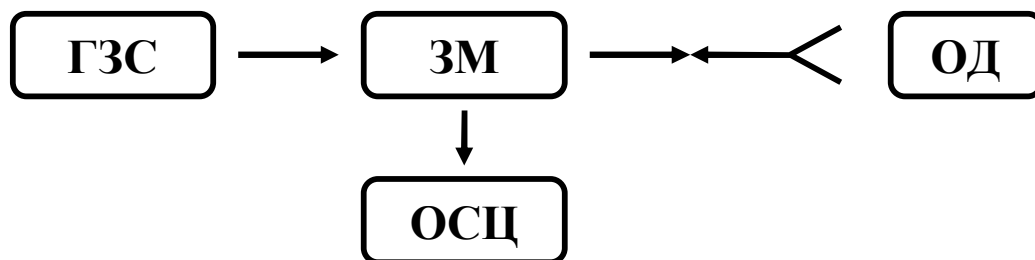


Рис. 2. Структурна схема рефлектометра для вимірів у вільному просторі.

Зонduючий сигнал генератора (ГЗС) через широкосмуговий змішувач (ЗМ) (виконаний у вигляді лінії передачі з входом і виходом - змішувач "на прохід") надходить на досліджуваний об'єкт(ОД) і одночасно, після стробоскопічного перетворення, спостерігається на екрані осцилографа (ОСЦ). Відбитий від досліджуваного об'єкту сигнал, пройшовши змішувач, після стробоскопічного перетворення, спостерігається разом із зонduючим сигналом на екрані осцилографа. Отримані сигнали, після Фур'є-перетворення, обробляють і визначають коефіцієнти розсіювання  $S_{11}$  і  $S_{12}$  матеріалу зразка:

$$S_{11} = S_{22} \frac{\Gamma(1 - e^{-2x})}{(1 - \Gamma^2 e^{-2x})}; \quad (2)$$

$$S_{12} = S_{21} \frac{\Gamma(1 - \Gamma^2)e^{-x}}{(1 - \Gamma^2 e^{-2x})}, \quad (3)$$

де

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\mu} - \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\mu} + \sqrt{\varepsilon}},$$

$$x = j\gamma_0 \sqrt{\mu \cdot \varepsilon}. \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \mu' - j\mu'' \\ \varepsilon &= \varepsilon' - j\varepsilon'' \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Тут  $\mu', \varepsilon'$  – дійсний, а  $\mu'', \varepsilon''$  – уявні складові комплексних величин  $\varepsilon$  і  $\mu$ .

При відомих значеннях  $S_{11}$  і  $S_{21}$  систему виразів (2), (3) можна вирішити відносно  $\varepsilon$  і  $\mu$  наступним чином:

$$\varepsilon = \sqrt{DC}, \quad \mu = \sqrt{\frac{C}{D}}, \quad (6)$$

де

$$D = \frac{1 - 2S_{11} + |S|}{1 + 2S_{11} + |S|}, \quad (7)$$

$$C = \frac{\gamma^2}{\gamma_0^2}, \quad \gamma = \gamma_u + n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

$$\gamma_u = \ln(P \pm \sqrt{P^2 - 1}),$$

$$P = \frac{1 - |S|}{2S_{21}}, \quad (9)$$

$$|S| = S_{11}^2 - S_{21}^2. \quad (10)$$

З (2)-(10) витікає, що одночасний вимір частотних залежностей  $S_{11}(f) = S_{21}(f)$  зразка, відповідно до рис. 2, в принципі дозволяє вирішити завдання визначення частотних залежностей комплексних значень  $\varepsilon$  і  $\mu$ . Проте практична реалізація отримання необхідних характеристик для дослідження біологічних об'єктів у вільному просторі. Розглянемо детальніше шляхи практичної реалізації цього методу виміру  $\varepsilon$ ,  $\mu$  і сферу його застосування для дослідження біологічних об'єктів у вільному просторі.

Найбільшого поширення при дистанційному зондуванні отримали рефлектометри з імпульсними радіосигналами [3...5].

В існуючих рефлектометрах [4] застосовують генератор імпульсів на діоді Ганна, потужністю близько 3 Вт на несучій частоті 6,2 або 6,5 ГГц. Відбиті сигнали через циркулятор надходили на вхід стробо-

скопичного осцилографа, що дозволяло виявити неоднорідності з коефіцієнтом відображення близько  $5 \cdot 10^{-4}$ .

При рефлектометричних вимірах має значення можливість настроювання несучої частоти зонduючого сигналу в широкому діапазоні частот, що дозволяє оцінювати відбиваючий об'єкт частотної характеристики модуля коефіцієнта відображення.

Зонduючі радіоімпульси тривалістю 2...200нс і потужністю близько 70 мВт отримуються за допомогою швидкодіючого надширококугового модуля на р-і-п діоді з безперервним сигналом зовнішнього генератора гармонійних коливань з частотою 1...18 ГГц. Відбиті сигнали можуть безпосередньо спостерігатися на ширококуговому осцилографі, що забезпечує динамічний діапазон близько 40 дБ, цілком достатній, наприклад, для виміру параметрів елементів антенного тракту рефлектометричної системи.

Описаний варіант імпульсного рефлектометра із зонduючим сигналом у вигляді радіоімпульсу великої тривалості з крутим фронтом [4] забезпечує можливість контролювати відбиті сигнали, які багаторазово накладаються один на інший, що в принципі дозволяє виміряти їх модулі і фази.

Досить велике поширення отримали кореляційні рефлектометри з лінійною частотною модуляцією і усереднюванням кореляційного добутку зонduючого і відбитого сигналів на проміжних частотах, що дозволяє побудувати багатоканальну схему корелометра без аналогової лінії затримки. Схема такого корелометра містить перемножувач зонduючого і відбитого сигналів і систему фільтрів, налаштованих на частоти  $F_l$  [5],

Відомо декілька реалізацій вимірювальних пристроїв, що видають результати вимірів в часовій області, але їх використовують при вимірах об'єктів гармонійних сигналів великої тривалості.

Наведені в дослідженні приклади використання сучасних радіоімпульсних систем показують, що для діелектричної спектроскопії біооб'єктів у вільному просторі, обумовленої властивостями матеріалів, існуючі радіочастотні імпульсні системи у більшості випадків малопридатні. Річ у тому, що залежність від частоти  $\varepsilon$  і  $\mu$  найбільш помітна поблизу ліній поглинання, тобто в частотних зонах малопридатних для існуючих процесів радіоімпульсного дистанційного зондування об'єктів.

Останнім часом широкого поширення набули рефлектометри, що використовують відеоімпульсні сигнали, тобто відеоімпульсні рефлектометри, тривалість фронту апаратурною функції яких 28...100 пс. Імпульсний рефлектометр, що має змішувач на тунельно-

му діоді і працюючий з використанням принципу дискримінатора миттєвих значень, має особливо високу чутливість і дозволяє вимірювати параметри як твердих, так і рідких діелектриків в діапазоні  $10^5 \dots 10^{10}$  Гц з похибкою вимірювання 1...3% [3].

Але даний тип рефлектометрів, за рахунок їх низької імпульсної потужності генераторів зондуючого сигналу в НВЧ діапазоні, не може бути застосований для дослідження біоб'єктів у вільному просторі. Крім того, в відеоімпульсних рефлектометрах результати видаються тільки на кратних частотах у відмінності від частотного сканування, в якому вимірювання можуть виконуватися на будь якій вибраній частоті.

*Висновки.* Таким чином, проведений аналіз методів і сучасного стану технічних облаштувань рефлектометрії дозволяє зробити висновки про те, що нині відсутні спеціалізовані рефлектометри, призначені для виміру діелектричної проникності біологічних об'єктів у вільному просторі. Для дистанційного виміру діелектричної проникності біологічних об'єктів рефлектометричними системами в широкому частотному діапазоні необхідно використати радіоімпульси нано- і субнано-секундній тривалості, а також методи частотного сканування. Це в свою чергу вимагає розробки методик виміру і спеціалізованих рефлектометричних систем.

#### Література.

1. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. А. А. Брандт. – М.: Энергия, 1964. – 263 с.
2. Завьялов А. С. Измерение параметров материалов на СВЧ / А.С. Завьялов. – Томск.: Издательство Томского университета, 1985. – 215 с.
3. Глебович Г. В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г. В. Глебович, А. В. Андриянов, Ю. В. Введенский. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
4. Андриянов А.В. Радиоимпульсный рефлектометр наносекундного диапазона / Андриянов А.В., Булатов Е.И., Введенский Ю.В. // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – № 2. – С. 141 – 154.
5. Власов М. М., Петров В. П. Состояние и перспективы развития ЧМ рефлектометрии / Власов М. М., Петров В. П. В кн.: Радиотехнические излучения в диапазонах высоких и сверхвысоких частот: тезисы докл. Всесоюзн. конф. – Новосибирск, 1980. – 223 с.

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ  
ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИООБЪЕКТОВ**

Борохов И.В., Федюшко Ю.М.

*Аннотация* – статья посвящена анализу современных методов дистанционного измерения диэлектрических свойств биологических объектов в свободном пространстве. Показаны структурные схемы измерения диэлектрической проницаемости методом свободного пространства с использованием измерительной линии и рефлектометра для проведения измерений в свободном пространстве.

**ANALYSIS OF CURRENT METHODS AND DISTANCE  
MEASURING DIELECTRIC PROPERTIES BIOOBJECTS**

I. Borochoy, U. Fediushko

**Summary**

The article analyzes the modern methods and means of distance measuring dielectric properties of biological objects in free space. Present diagrams measuring permittivity of free space by using a measuring line and reflectometer for measurements in free space.