

УДК 621.372.828

В.В. Чухов, аспір.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

АМЛІТУДНО-ЧАСТОТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Розглянуто модифікований хвильовий метод вимірювання комплексних діелектричної та магнітної проникностей. Наведено розрахункові формули, схему вимірювальної установки та вимоги до її складових частин.

На сучасному етапі в різних галузях техніки широко використовуються діелектрики та металодіелектрики. Це вимагає розробки зручних і досить точних методів та засобів вимірювання електродинамічних характеристик таких матеріалів.

Існує велика кількість варіантів методів вимірювань такого роду. Проте всі ці методи вимірювання комплексних діелектричної $\hat{\epsilon}$ та магнітної $\hat{\mu}$ проникностей можна поділити на такі групи:

- за коефіцієнтами відбиття та проходження електромагнітної хвилі через зразок матеріалу;
- за зміною резонансної частоти і добротності резонатора при введенні в нього зразка досліджуваного матеріалу.

В свою чергу, методи вимірювань першої групи поділяються на хвильові та квазіоптичні, а методи вимірювань другої групи мають різновиди та залежності від типів використовуваних резонаторів і форм досліджуваних зразків [1].

В даній роботі буде розглянуто метод, що відноситься до першої групи. Його ще можна назвати методом короткого замикання та холостого ходу. Сутність методу пояснюють рис. 1, а, 1, б.

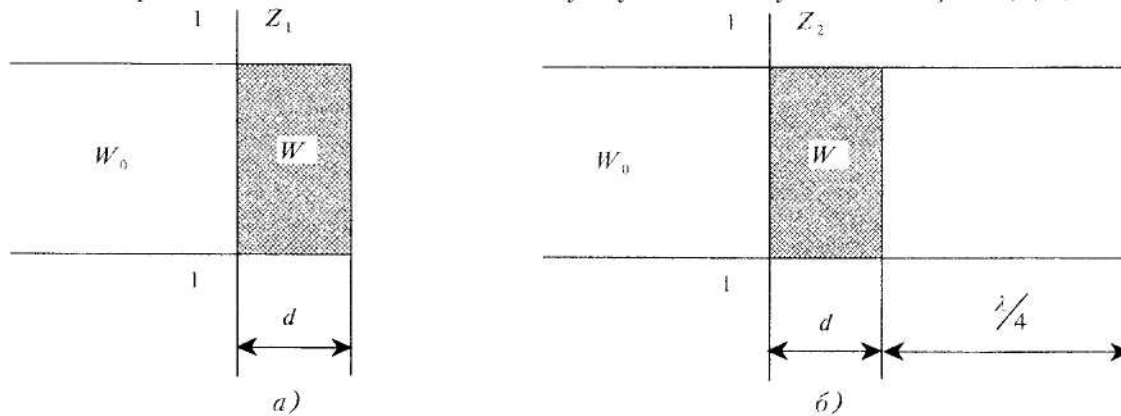


Рис. 1

Зразок досліджуваного матеріалу розташовують в хвильоводі. Вимірюють амплітуду і фазу коефіцієнта відбиття в двох режимах. Спочатку зразок розташовується впритул до короткозамикаючого поршня, що відповідає режиму короткого замикання на кінці хвильоводу (рис. 1, а), а потім поршень зміщується на чверть довжини хвилі в хвильоводі $\lambda/4$. Цим самим забезпечується режим холостого ходу. Його можна реалізувати і без короткозамикаючого поршня, вибираючи товщину зразка d досить великою для повного гасіння проникаючої в нього електромагнітної хвилі [2].

Вхідний нормований опір Z' в перерізі 1-1 можна виразити через комплексний коефіцієнт відбиття навантаження \hat{R} за допомогою формули:

$$Z' = \frac{Z}{W_0} = \frac{1 + \hat{R}}{1 - \hat{R}}, \quad (1)$$

де W_0 – хвильовий опір незаповненої підвідної лінії передачі (хвильовий опір порожнього хвильоводу в даному випадку), до якого здійснюють нормування; Z – ненормований вхідний опір.

Таким чином, вимірюючи комплексний коефіцієнт відбиття від розглядуваної системи, можна завжди знайти вхідний опір Z . За знайденими вхідними опором лінії передачі в режимах короткого замикання Z_1 та холостого ходу Z_2 можна розрахувати комплексні значення $\hat{\epsilon}$ та $\hat{\mu}$.

Вхідні опори Z_1 та Z_2 пов'язані з хвильовим опором W і сталою поширення γ в зразку такими формулами:

$$Z_1 = W \tanh \gamma d, \quad Z_2 = W \coth \gamma d. \quad (2)$$

Розв'язок цієї системи відносно W та γ має вигляд:

$$W = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{2d} \ln \frac{1 + \sqrt{Z_1/Z_2}}{1 - \sqrt{Z_1/Z_2}}. \quad (4)$$

З іншого боку, хвильовий опір хвилеводу (для H -хвиль) пов'язаний зі сталою поширення в хвилеводі γ співвідношенням:

$$W = \dot{\mu} \frac{\gamma_0}{\gamma}, \quad (5)$$

$$\gamma^2 = k^2 \dot{\epsilon} \dot{\mu} - \chi^2, \quad (6)$$

де $\gamma_0^2 = k^2 - \chi^2$ – стала поширення порожнього хвилеводу;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число вакууму;

χ – поперечне хвильове число.

Коли підставимо вирази (3) і (4) в (5), отримаємо формулу для $\dot{\mu}$:

$$\dot{\mu} = \frac{\sqrt{Z_1 Z_2}}{2d \gamma_0} \ln \frac{1 + \sqrt{Z_1/Z_2}}{1 - \sqrt{Z_1/Z_2}}. \quad (7)$$

З виразу (6) отримаємо формулу для $\dot{\epsilon}$:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\dot{\mu}} \left[\left(\frac{\gamma}{k} \right)^2 + \left(\frac{\chi}{k} \right)^2 \right] = \frac{1}{\dot{\mu}} \left[\left(\frac{\gamma}{k} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}} \right)^2 \right], \quad (8)$$

де λ_{cr} – критична довжина хвилі в хвилеводі.

Таким чином, підставивши в (7) і (8) значення Z_1 та Z_2 , знайдемо шукані значення $\dot{\epsilon}$ та $\dot{\mu}$.

Залишається відкритим питання стосовно того, чим здійснювати вимірювання \dot{R} . Наприклад, з цією метою можна використати вимірювальну лінію або векторний аналізатор кіл. Проте здійснювати вимірювання \dot{R} можна також і за допомогою панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (КСХН).

Розв'яжемо спочатку допоміжну задачу, попередньо ввівши термін “досліджуване навантаження” для відрізка хвилеводу зі зразком діелектрика. Розглянемо структуру, схему якої показано на рис. 2.

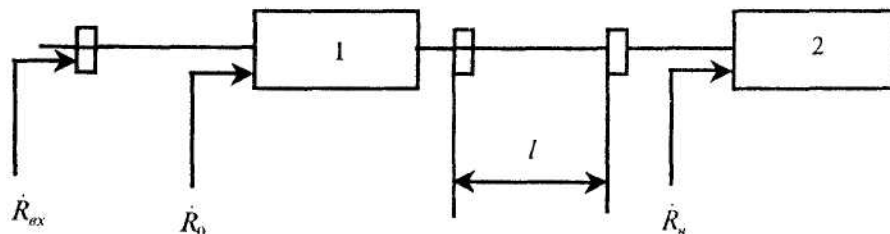


Рис. 2. Схема послідовного з'єднання:
1 – відбиваючий чотириполюсник; 2 – досліджуване навантаження

Схема унаочнює послідовне з'єднання відбиваючого чотириполюсника з комплексним коефіцієнтом відбиття $\dot{R}_0 = R_0 e^{i\varphi_0}$ (тут і надалі для комплексних величин використовується показникова форма запису), відрізка регулярного хвилеводу довжиною l і досліджуваного навантаження з комплексним коефіцієнтом відбиття $\dot{R}_n = \dot{R} = R_n e^{i\varphi_n}$.

Для знаходження модуля коефіцієнта відбиття всієї структури R_{ex} скористаємося формулою для вхідного коефіцієнта відбиття чотириполосника з довільним навантаженням. При цьому розглядатимемо з'єднання відбиваючого чотириполосника та відрізка довжиною l не як послідовне з'єднання чотириполосників, а як випадок зсуву площини відліку для відбиваючого чотириполосника у вихідному плечі на довжину l . Крім того, вважатимемо, що цей чотириполосник є взаємним. В результаті отримаємо:

$$R_{\text{ex}}^2 = \frac{R_0^2 + R_n^2 - 2R_0R_n \cos(2\beta l - \varphi_0 - \varphi_n)}{1 + R_0^2R_n^2 - 2R_0R_n \cos(2\beta l - \varphi_0 - \varphi_n)}, \quad (9)$$

де $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – довжина хвилі в хвилеводі.

З (9) отримаємо вираз для фази коефіцієнта відбиття досліджуваного навантаження:

$$\varphi_n = \arccos \left[\frac{R_0^2 + R_n^2 - R_{\text{ex}}^2(1 + R_0^2R_n^2)}{2R_0R_n(1 - R_{\text{ex}}^2)} \right] + 2\beta l - \varphi_0 - 2n\pi, \quad (10)$$

де $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Отже, фазу коефіцієнта відбиття можна визначити з (10) за вимірними значеннями R_{ex} , R_0 , R_n , заданими l та φ_0 .

Таким чином, підключивши структуру, зображену на рис. 2, до виходу панорамного вимірювача КСХН, можна виміряти фазу коефіцієнта відбиття [3].

На індикаторі панорамного вимірювача КСХН амплітудно-частотна характеристика такої структури нагадує картину стоячої хвилі у вимірювальній лінії. В діапазоні робочих частот хвилеводу $[f_n, f_n]$ розташовується кілька мінімумів КСХ. Цю властивість, як і при вимірюванні параметрів діелектричної проникності слабопоглинаючих діелектриків [4], можна використати при вимірюванні фази коефіцієнта відбиття. Згідно з (9), умова мінімуму R_{ex} має вигляд [3]: $2\beta l - \varphi_0 - \varphi_n = 2n\pi$. Звідси, фаза коефіцієнта відбиття на частоті f_i дорівнює:

$$\varphi_n = \frac{4\pi}{\lambda_i} \left(l - n_i \frac{\lambda_i}{2} \right) - \varphi_0, \quad (11)$$

де λ_i – довжина хвилі в хвилеводі на частоті f_i ; n_i – число довжин півхвиль ($\frac{\lambda_i}{2}$), що вкладається на довжині l .

Отже, знаючи l , φ_0 і λ_i , знайдемо значення φ_n на частоті f_i .

Кількість частот f_i , на яких можна виміряти фазу φ_n , визначається числом мінімумів m вхідного коефіцієнта відбиття R_{ex} :

$$m = \frac{2l}{\lambda_n} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_n} - 1 \right), \quad (12)$$

де λ_n , λ_n – довжини хвиль в хвилеводі на крайніх (низькій та високій) частотах його робочого діапазону.

Розглянемо тепер вимоги до елементів схеми. В якості відбиваючого чотириполосника можна вибрати неоднорідність будь-якого типу. КСХ неоднорідності вибирається близьким до КСХ вимірюваного навантаження для забезпечення більш глибоких мінімумів вхідного коефіцієнта відбиття R_{ex} , що, в свою чергу, дозволяє більш точно знаходити частоти f_i . Довжина відрізка регулярного хвилеводу вибирається з умови (12) за заданим числом точок в діапазоні робочих частот хвилеводу, на яких слід виконати вимірювання фази коефіцієнта відбиття навантаження.

В якості еталонного навантаження для калібрування схеми потрібно вибрати навантаження з відомим значенням φ_n . Ним може бути, наприклад, короткозамикаючий щоршень. Адже фаза коефіцієнта відбиття від щоршня (по електричному полю) дорівнює π .

Таким чином, вимірювання комплексних проникностей ϵ та μ діелектриків і металодіелектриків можна здійснювати на основі серійного вимірювального приладу – панорамного вимірювача КСХН, забезпечуючи тим самим простоту та універсальність методу вимірювання у всьому робочому діапазоні частот хвилеводу. Метод дозволяє знайти W та γ в довільному навантаженні, що можна використати для вимірювання параметрів хвилеводів з частковим заповненням.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Казанцев Ю.Н.* Методы и средства измерения электродинамических характеристик радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов // Proceedings of XIV-th International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics, Microwave Ferrites, vol. 2, 1998.
2. *Касимов Э.Р., Садыхов М.А., Касимов Р.М., Каджар Ч.О.* Метод измерения диэлектрических свойств сильнопоглощающих веществ в диапазоне СВЧ // Измерительная техника, 1999. – № 5.
3. *Гончаров А.К.* Амплитудно-частотный метод измерения фазы коэффициента отражения // Измерительная техника, 1981. – № 12.
4. *Чухов В.В.* Використання матричного підходу для описання властивостей шаруватих структур // Вісник ЖІТІ / Технічні науки, 1999. – № 11.

ЧУХОВ Владислав Вікторович – аспірант кафедри медичних приладів та систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- технічна електродинаміка;
- пристрої НВЧ та антени.

Подано 22.11.1999.