

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ ТКАНИН ЛЮДИНИ

© Яковенко Є.І., 2001

Запропонований вдосконалений метод вимірювання електродинамічних параметрів композитних матеріалів для імітації тканин людини.

Improved method for electrodynamic parameters of imitated human tissues composite materials measuring is proposed.

Розробка композитних матеріалів для імітації тканин людини є необхідним етапом для створення фантомів людини, що починають знаходити широке застосування при вирішенні медичних (НВЧ-терапія, гіпертермія) та екологічних (вплив електромагнітного випромінювання на здоров'я людини та засоби захисту) проблем. Більшість тканин людини (шкіра, м'язи, мозок, нирки та інші) характеризуються високим вмістом води, що зумовлює високі значення їх відносної діелектричної проникності (ϵ до 60 одиниць) та втрат ($\text{tg}\delta$ до 1.6) [1]. За відсутністю речовин із подібними електродинамічними характеристиками виникає необхідність розробки відповідних композитних матеріалів. Оскільки надійної теорії створення композитних матеріалів з заданими електродинамічними параметрами не існує, то основним засобом вирішення цієї проблеми є експеримент.

З погляду техніки дослідження розподілів електромагнітного поля та температур у фантомі людини при електромагнітних опроміненнях оптимальними є желеподібні матеріали, які дають змогу широко використовувати метод зондування. На основі желеподібних матеріалів передбачається створення фантома для дослідження розподілів поля в тілі людини від засобів мобільного зв'язку, що працюють в діапазонах дециметрових та сантиметрових хвиль. Таким чином, постає проблема вимірювання електродинамічних характеристик желеподібних матеріалів з високими значеннями ϵ та $\text{tg}\delta$ в діапазонах дециметрових та сантиметрових хвиль.

За даними літератури [2,3,4], в діапазоні НВЧ для вимірювання параметрів діелектриків найбільш широкого використання набули такі методи. Конденсаторний метод дає можливість вимірювати діелектричну проникність діелектриків на частотах до 30 МГц з прийнятними похибками. На вищих частотах паразитні параметри з'єднувальних провідників та елементів конструкції помітно зменшують точність вимірювання, особливо для діелектриків з високим значенням ϵ , для яких можуть виникати досить грубі похибки.

Резонансні методи в діапазоні НВЧ ґрунтуються на визначенні зміни параметрів резонатора до і після внесення в нього досліджуваного діелектрика. Резонансні методи найкраще пристосовані до вимірювання параметрів маловтратних діелектриків з невисоким значенням ϵ . Поширення цих методів на діелектрики з високими значеннями втрат та ϵ супроводжується ускладненнями апаратури та методики обробки результатів вимірювання. При цьому знижується точність результатів таких вимірювань.

Оптичні методи використовують зміну умов поширення електромагнітних хвиль при встановленні на їх шляху пластини з досліджуваного матеріалу. Ці методи вимагають добре сфокусованого електромагнітного випромінювання, що імітує плоску хвилю, і для послаблення впливу дифракційних явищ виконання умови $L \gg \lambda$, де L – поперечні до напрямку руху хвилі розміри вірця. Через це оптичні методи використовують для вимірювання параметрів діелектриків у міліметровому діапазоні хвиль.

Калориметричні та пондеромоторні методи вимірювання вимагають спеціалізованого вимірювального обладнання та використання потужних вимірювальних генераторів, що робить використання цих методів проблематичним.

Хвилеводні методи вимірювання ґрунтуються на визначенні параметрів хвильового процесу в напрямних системах (хвилеводах) при наявності та відсутності досліджуваного діелектрика. За даними [2] хвилеводні методи найдоцільніше використовувати для вимірювання параметрів діелектриків, що характеризуються параметрами: $\text{tg}\delta$ в межах $10^{-3} \dots 1$ та $\epsilon < 100$ в діапазонах дециметрових та сантиметрових хвиль. З врахуванням характеристик описаних вище методів вимірювання параметрів діелектриків, робочого діапазону частот та значень електродинамічних параметрів тканин тіла людини для контролю параметрів імітуючих їх композитних матеріалів найбільш придатними слід вважати хвилеводні методи.

З описаних в літературі хвилеводних методів з погляду поставленої задачі достатньо цікавим представляється метод повного заповнення поперечного перерізу хвилевода. Цей метод дає змогу вимірювати параметри рідких діелектриків при певних модифікаціях стандартної вимірювальної апаратури. Однак при вимірюванні параметрів желеподібних матеріалів, особливо в сантиметровому діапазоні хвиль, виникають значні проблеми, пов'язані з недостатньою механічною стійкістю зонда.

Останньої проблеми вдається уникнути при використанні методу тонкого вірця, основна ідея якого полягає у контролі зміни параметрів інтерференційної картини розподілу поля при внесенні вірця у хвилевід. Для вимірювання параметрів желеподібних матеріалів була виготовлена обойма, що встановлювалася на виході вимірювальної лінії. Проведені експерименти виявили певні проблеми, пов'язані зі специфікою дослідження желеподібних матеріалів: неможливість забезпечення стабільності товщини вірця та площинності його поверхні. Виконані вимірювання виявили значну дисперсію результатів, зумовлену вказаними причинами.

Для підвищення точності результатів вимірювання електродинамічних параметрів композитів був використаний метод реактивних навантажень [4], схема якого подана на рис. 1.

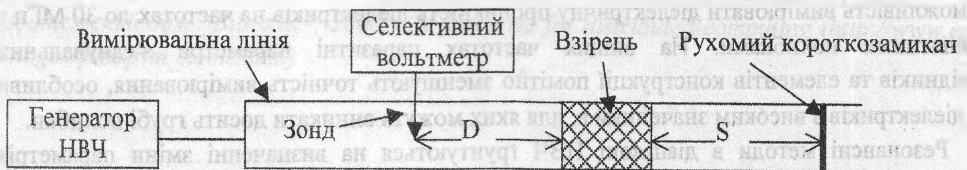


Рис. 1. Схема вимірювання електродинамічних параметрів матеріалів

Досліджуваний вірець 3 (рис.2) був встановлений в обойму 1, внутрішні поперечні розміри якої відповідали розмірам поперечного перерізу хвилевода вимірювальної лінії.

Для фіксації положення взірця відносно бокових площин обойми була встановлена заглушка 2 з пінополістиролу.

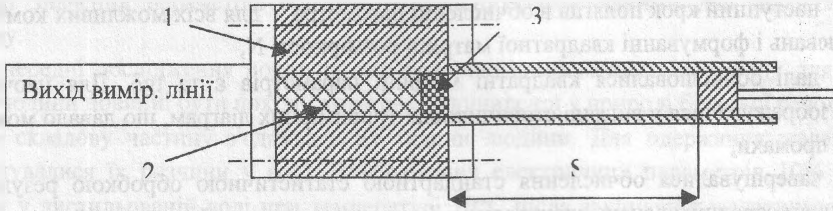


Рис.2.Обойма з досліджуваним взірцем

Методика вимірювань полягала у наступному:

- вимірювалася віддаль S_1 від задньої площини взірця до короткозамикача,
- вимірювалася віддаль від передньої площини взірця до мінімуму напруги у вимірювальній лінії D_1 ,
- вимірювався коефіцієнт стоячої хвилі K_1 в лінії,
- змінювалося положення короткозамикача і визначалися відповідні значення S_2, D_2, K_2 .

Далі обробка результатів вимірювання виконувалася у такій послідовності:

1.Обчислення фазової постійної : $\beta = 2\pi / \Lambda$, (1)

де Λ – довжина хвилі у вимірювальній лінії.

2.Визначення модулів коефіцієнта відбиття :

$$|\Gamma|_n = \frac{K_n - 1}{K_n + 1} \quad n = 1, 2 \quad (2)$$

3.Розрахунок вхідних провідностей взірця:

$$Y_n = \frac{1 + |\Gamma|_n \cdot \exp(j \cdot 2 \cdot \beta \cdot D_n)}{1 - |\Gamma|_n \cdot \exp(j \cdot 2 \cdot \beta \cdot D_n)} \quad n = 1, 2 \quad (3)$$

4.Обчислення вхідних провідностей короткозамкненої лінії:

$$Y_{0n} = -j \cdot \text{ctg}(\beta \cdot S_n) \quad n = 1, 2 \quad (4)$$

5.Розрахунок параметра :

$$Y = \frac{Y_1 \cdot Y_{01} \cdot (Y_2 - Y_{02}) - Y_2 \cdot Y_{02} \cdot (Y_1 - Y_{01})}{(Y_2 - Y_{02}) - (Y_1 - Y_{01})} \quad (5)$$

6.За знайденим комплексним параметром $Y = G + j \cdot B$ визначаємо діелектричну проникність та тангенс кута втрат:

- для коаксіальної лінії : $\epsilon = G$, $\text{tg} \delta = -B/G$ (6)

- для хвильоводної лінії : $\epsilon = \frac{G + \left(\frac{\Lambda}{2 \cdot a}\right)^2}{1 + \left(\frac{\Lambda}{2 \cdot a}\right)^2}$, $\text{tg} \delta = -\frac{B}{G + \left(\frac{\Lambda}{2 \cdot a}\right)^2}$, (7)

де a – розмір широкої стінки прямокутного хвильоводу.

Автором були зроблені такі вдосконалення вимірювання та обробки результатів:

- замість двох вимірювань виконувалася серія з N вимірювань і формувалися матриці-стовпці параметрів S , D і K ,
- наступний крок полягав в обчисленні параметра Y для всіх можливих комбінацій з N вимірювань і формуванні квадратної матриці розмірності N ,
- далі обчислювалися квадратні матриці параметрів ϵ та $\text{tg}\delta$. Для наочності ці матриці зображувалися у вигляді стовпчикових тривимірних діаграм, що давало можливість виявити промахи,
- завершувалися обчислення стандартною статистичною обробкою результатів з визначенням середніх значень електродинамічних параметрів та їх дисперсій.

За представленим алгоритмом була розроблена програма на основі пакета прикладних математичних програм Mathcad і виконане тестування методики вимірювання та обробки результатів для діелектрика з відомими характеристиками. При виборі діелектрика для тестування було враховано, що для деяких з них електродинамічні параметри залежать від способу одержання, що дає певну неоднозначність параметрів. Тому був вибраний поліметилметакрилат, який одержується одним способом. Результати вимірювання та обробки даних за удосконаленою методикою подані на рис.3. у вигляді стовпчикових діаграм.

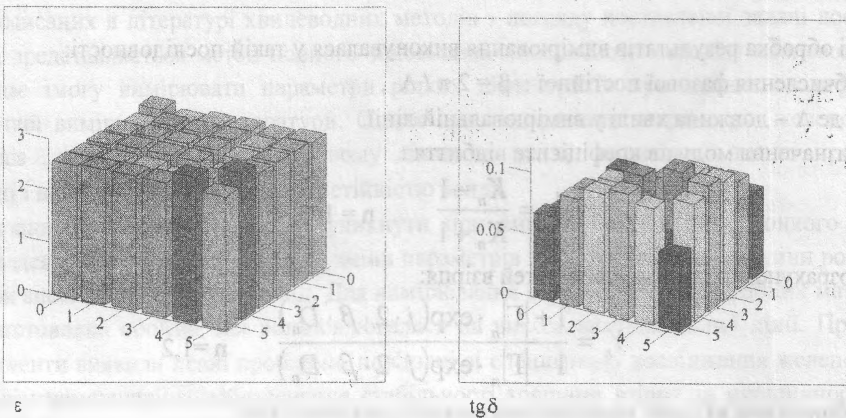


Рис.3.Результати вимірювання електродинамічних характеристик поліметилметакрилату

Були також проведені дослідження з метою випрацювання рекомендацій щодо техніки виконання вимірювань. Для цього була здійснена серія вимірювань зі зміною положення короткозамикаючого поршня в межах від 0 до $\Lambda/2$ через 0.02Λ . Далі була виконана обробка даних для кількох серій по 6 вимірювань з поступовим зменшенням границь в межах від 0 до $\Lambda/2$. Аналіз результатів виявив найбільшу розбіжність параметрів ϵ та $\text{tg}\delta$ для серії вимірювань в зоні короткого замикання ($S=0$), а найменшу при вимірюваннях в зоні ненавантаженого режиму ($S=\Lambda/4$). Одержаний результат можна пояснити значною крутизною характеристики провідності короткозамкненої лінії в області нуля (4). За цими даними для підвищення точності доцільно виконувати вимірювання при зміщенні короткозамкача в межах приблизно $\Lambda/8 \dots \Lambda/4$ від досліджуваного взірця.

Після проведення серії з 6-ти вимірювань згідно з поданими рекомендаціями на частоті 9.3 ГГц для поліметилметакрилату були одержані середні значення $\epsilon = 2.56$ та $\text{tg}\delta =$

0.072 при величинах дисперсії $\sigma_1 = 0.077$ та $\sigma_2 = 0.008$ відповідно. Столпчикові діаграми показали хорошу збіжність результатів окремих вимірювань та відсутність промахів. Одержані значення параметрів збіглися з довідниковими даними для досліджуваного матеріалу.

Попередні дослідження показали, що основою композитного матеріалу для імітації тканин людини повинні бути похідні колагену – поширеної у природі білкової речовини, що утворює складову частину з'єднувальних тканин людини. Для одержання желеподібної маси готувалися їх розчини у воді. Вимірювання електричних параметрів 10% розчину колагену у дистильованій воді при температурі 20°C після закінчення желатинизації дали такі результати: середні значення параметрів $\epsilon = 63.1$, $\text{tg}\delta = 0.51$; дисперсія параметрів $\sigma_1 = 3.6$, $\sigma_2 = 0.10$, відповідно.

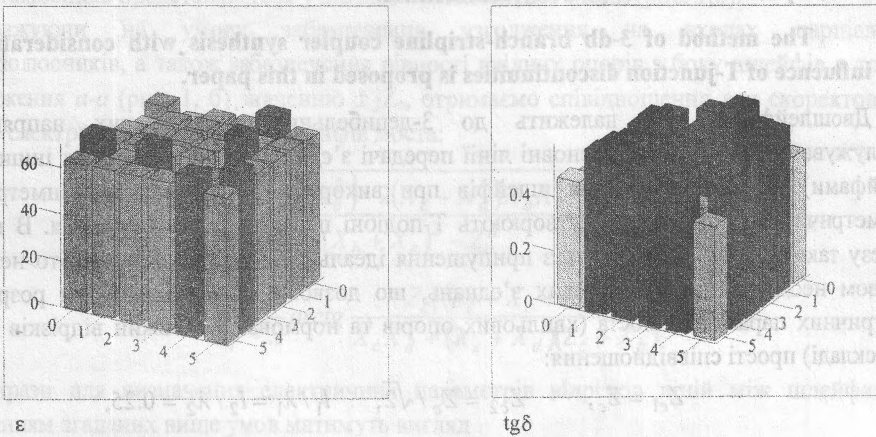


Рис. 4. Дані по кожному з серії вимірювань ϵ та $\text{tg}\delta$

За одержаними результатами з метою підвищення точності методу реактивних навантажень запропоновано виконання серії вимірювань для різних значень реактивних навантажень з представленням даних у матричному вигляді з наступною їх обробкою і візуалізацією результатів у вигляді стовпчикових діаграм. Для зменшення випадкової похибки використовуються виключення промахів та наступна статистична обробка. Удосконалена методика відноситься до нерівноточних вимірювань, які дають змогу зменшити систематичну похибку вимірювань. Метод може бути рекомендований для вимірювання параметрів діелектриків в твердому та желеподібному стані в діапазоні НВЧ.

1. Marha K., Musil J., Tuha H., *Electromagnetic Field and the Life Environment* (San Francisco: San Francisco Press, 1971).
2. А.А.Брандт. *Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах.* – М.: Гос. изд. физико-математической литературы, 1963.
3. Захарія Й.А. *Основи надвисокочастотних радіовимірювань.* – К., Вища школа, 1972.
4. *Измерения в электронике. Справочник, Т.1./Ред.-сост. Б.А.Доброхотов.* – М.: Энергия, 1965.