

Харківський національний університет радіоелектроніки

Бухаров Сергій Володимирович 

УДК 621.317+621.372.85.3.1

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПРИСТРОЇВ ТА МЕТОДІВ
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЧОВИН**

05.12.07 — антени та пристрої мікрохвильової техніки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків — 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор Овсяніков Віктор Володимирович, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри електронних засобів телекомунікацій;

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент Панченко Олександр Юрійович, Харківський національний університет радіоелектроніки професор кафедри проектування і експлуатації електронних апаратів

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Прокопенко Юрій Володимирович, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я.Усікова НАН України, старший науковий співробітник

Захист відбудеться “12” червня 2012 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою:

61166, м. Харків, просп. Леніна 14, ауд. 13)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою:

61166, м. Харків, пр. Леніна 14

Автореферат розісланий “11” травня 2012р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Безрук В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вимірювання параметрів діелектричних матеріалів у широкій смузі частот та температур є важливою науково прикладною задачею. Світовий досвід досліджень свідчить про те, що на рішення цієї задачі впливає багата кількість факторів, урахування яких робить конкретне технічне рішення унікальним. Класичні мікрохвильові методи дослідження параметрів діелектриків, наведені в роботах А.В. Харвея, А.А. Брандта, Ш.Б. Надя, В.А. Вікторова, А.С. Совлукова та інших авторів, використовуються і у теперішній час, але сучасний стан виробництва та лабораторних досліджень діелектриків потребує більш універсальних та оперативних методів, які б дозволяли пристосовувати одне рішення для багатьох задач.

Побудова мікрохвильового пристрою для діагностики параметрів діелектриків залежить від обраних методів вимірювань та обробки сигналів від властивостей первинних вимірювальних перетворювачів. Досить часто, прилад, призначений для вимірювань у вузькому діапазоні діелектричної проникності зразка, складно пристосувати для інших матеріалів, а прилади для вимірювання проникностей в широкому діапазоні слабо відчують невеликі зміни проникності зразка.

Висока вартість векторних аналізаторів параметрів тракту та складність математичних моделей сенсорів у широкій смузі частот перешкоджає широкому впровадженню вимірювачів параметрів діелектричних матеріалів у виробництво. Досить часто виникає потреба оцінки неелектричних параметрів речовин, що косвеним чином залежать від діелектричної проникності, наприклад, зміст домішок, концентрація розчину, параметри суміші, октанове число бензинів, вологість, зольність вугілля. Існує необхідність побудови теоретичних градувальних залежностей, що пов'язують вимірювані параметри тракту з комплексною діелектричною проникністю (далі КДП) та іншими параметрами речовин.

Одним із способів вирішення задачі зменшення витрат на мікрохвильові дослідження є розширення можливостей існуючих сенсорів, удосконалення методів вимірювань, пристосування для вимірювань більш доступних та дешевих приборів.

При проведенні вимірювань у широкій смузі частот і проникностей відбувається зміна усього частотного спектра вимірювального осередка, зникають старі та з'являються нові резонанси. Щоб отримати новий спектр вимірювального осередка необхідно вирішувати цілу низку задач для кожної моди, що значно ускладнює розв'язання задачі по визначенню залежності між інформаційними характеристиками вимірювального осередка та параметрами зразка.

Таким чином, актуальною є дисертаційна робота, що спрямована на вдосконалення мікрохвильових пристроїв та методів вимірювань за рахунок

настроювання властивостей сенсора та використання більш універсальних методів обробки сигналів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження зв'язані з науково-дослідними роботами, що виконувались на кафедрі електронних засобів телекомунікацій Дніпропетровського національного університету ім. Олеся Гончара, і на державному підприємстві „Дніпропетровський регіональний державний науково технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації”, у яких автор був виконавцем, зокрема: НДР № 0106U000788 „Оптимізація характеристик просторової та радіометричної розрізненості багатоспектральних фотограмметричних зображень дистанційного зондування”, НДР № 344 від 10 вересня 2004 р. „Дослідження радіофізичного методу експрес-контролю якісних характеристик світлих нафтопродуктів та товарного вугілля”.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є вдосконалення мікрохвильових приладів та методів визначення діелектричної проникності, розвиток принципів будови хвилеводних та резонаторних сенсорів, методів обробки сигналів, що використовуються у мікрохвильових вимірюваннях параметрів діелектричних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

1. Визначення зв'язку між КДП (або іншими параметрами діелектричних речовин) та характеристиками тракту з вимірювальним осередком, в залежності від особливостей конструктивної реалізації сенсорів.

2. Вдосконалення хвилеводних та резонаторних сенсорів з частковим заповненням.

3. Розробка та вдосконалення методів та приладів для вимірювання параметрів діелектричних матеріалів на основі порівняння ознак частотних залежностей коефіцієнта стоячої хвилі (далі КСХН) або перехідного послаблення вимірювального осередка.

Об'єкт дослідження. Хвильоводні та резонаторні сенсори у вимірювальних трактах мікрохвильових пристроїв для дослідження параметрів діелектричних речовин.

Предмет дослідження. Частотні залежності КСХН або коефіцієнта передачі мікрохвильових сенсорів з частковим заповненням діелектриком, чутливість яких керується параметрами заповнення.

Методи досліджень. Під час розв'язання поставлених задач використано: для моделювання сенсорів — макроскопічна теорія електромагнітного поля, теорія НВЧ ланцюгів; для визначення зв'язку між параметрами вимірювального тракту та КДП зразка діелектрика — методи чисельного рішення систем рівнянь; для вдосконалення конструкції сенсорів — методи оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Дістала подальшого розвитку методика проектування хвилеводних та резонаторних сенсорів з частковим заповненням. Регулювання чутливості сенсора здійснюється добором рівня заповнення та розміщенням у

вимірювальному осередку додаткових діелектричних вставок із матеріалу з відомими параметрами.

2. Вперше запропоновано метод виділення та порівняння ознак частотних залежностей (далі ЧЗ) КСХН або послаблення для вимірювання параметрів діелектричних матеріалів. Виділяються набори ознак характерних ділянок ЧЗ КСХН та коефіцієнту передачі вимірювального осередку (мінімумів та максимумів) із моделі ЧЗ у вигляді поліномів.

3. Вперше запропоновано опис еталонів діелектриків у вигляді поліномів, до яких входять усі резонансні частоти, що спостерігаються при заповненні вимірювального осередку досліджуваним зразком. Положення окремих резонансів отримується шляхом розв'язання низки рівнянь, які є моделями сенсорів з частковим заповненням діелектриком з втратами. При співпаданні резонансів, що розраховані при підстановці наближення проникності, з резонансами, що відповідають еталону, значення модулю поліному буде мінімальним.

4. Отримав подальший розвиток метод побудови теоретичних калібрувальних залежностей між КДП зразка та параметрами частотних характеристик КСХН або перехідного послаблення хвилеводних та резонаторних вимірювальних осередків.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

1. Запропоновані вдосконалення вимірювальних осередків дозволяють розширювати, або звужувати діапазон вимірюваних діелектричних проникностей у певному діапазоні частот застосовувати один пристрій для інших методів вимірювань.

2. Запропонований метод розпізнавання дозволяє проводити ідентифікацію та сортування зразків діелектриків при неповному наборі резонансів, що розраховуються; зменшується кількість точок частотної залежності КСХН або коефіцієнта передачі, у яких здійснюються вимірювання та розрахунки

3. Збільшується точність та швидкість вимірювань за рахунок обору оптимальної кількості точок частотної залежності, що обробляється. Менша кількість точок відліку частоти дозволяє більш точно відкалібрувати генератор та детектори.

4. Результати роботи були впроваджені в практику робіт державного підприємства „Дніпропетровський регіональний державний науково технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації” при дослідженні параметрів рідких та сипучих речовин, Державного підприємства “Конструкторське бюро “Південне” ім. М.К. Янгеля в процесі дослідження діелектричних властивостей ізоляційних та конструктивних матеріалів.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення і результати дисертації розроблено автором самостійно. З робіт, які опубліковано разом із співавторами, у дисертації використано лише ті матеріали, які отримано автором особисто або в одержанні яких автор брав безпосередню участь. В роботах що опубліковані із співавторами [1,3,7,8,9,10,11] здобувачу належить участь у розробці методів вимірювань,

проектування вимірювальних осередків, розробка обчислювальних програм, постановка експерименту, обробка результатів вимірювань.

Апробація роботи. Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідалися на вітчизняних та міжнародних конференціях з публікаціями у відповідних трудах конференцій [11—15]: III rd Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (м. Севастополь, 1999 р.); 8-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (м. Харків, 2000 р.); 2002 International Conference on mathematical methods in electromagnetic theory (м. Київ, 2002 р.); IV rd Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (м. Севастополь 2003 р.); CriMiCo 2004 (м. Севастополь 2004); щорічні наукові конференції Дніпропетровського національного університету (м. Дніпропетровськ 2002—2011 р.р.).

Публікації. Матеріали дисертації викладені у 15 наукових публікаціях, з них: 5 статей у фахових виданнях, 2 патенти України, 5 робіт у трудах конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 81 найменувань, містить 135 сторінок, 65 рисунків і 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми досліджень, формулюється мета досліджень, наводяться наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів досліджень.

У першому розділі аналізується сучасний стан проблем мікрохвильової діагностики параметрів діелектричних речовин, визначається коло питань, що підлягають дослідженню та вдосконаленню.

Основним вузлом мікрохвильових приладів для діагностики, що визначає параметри інших вузлів (смугу частот генераторів, підсилювачів, детекторів, фільтрів, частотомірів), є первинний перетворювач. Проведений аналіз робіт дозволяє зробити висновки, що при використанні сенсору певного типу існують обмеження на смугу частот, та параметри зразка, оскільки в математичній моделі сенсору робляться певні припущення, що спрощують розрахунки, градування сенсорів зазвичай виконується з використанням еталонних зразків. Більш точні моделі не завжди забезпечують високу збіжність результатів при чисельній реалізації, потребують значних обчислювальних ресурсів. При дослідженні параметрів діелектриків в широкому діапазоні частот відповідну задачу необхідно вирішувати на сітці частот, що потребує значного часу, в залежності від кількості відліків частоти змінюється час обробки результатів вимірювань та видачі результатів. Кількість задач, які можуть бути вирішені автономними вимірювачами у реальному часі обмежена, тому більшість пристроїв для

дослідження параметрів діелектричних матеріалів використовують теоретичні, або емпіричні калібрувальні залежності між КДП та вимірюваними параметрами хвильоводного тракту.

Таким чином робиться висновок про необхідність подальшого розвитку конструкцій і математичних моделей сенсорів, удосконалення методів вимірювань, способів виділення корисної інформації, щоб охопити велику кількість сучасних діелектричних матеріалів.

У другому розділі теоретично обґрунтовується зміна чутливості сенсорів на основі полих хвильоводів (рис.1) в залежності від параметрів геометричного та діелектричного заповнення внутрішньої порожнини. Пропонується вдосконалення хвильоводного методу визначення КДП, при якому при заповненні області 2 отримуються такі властивості сенсору, що при зміні діелектричної проникності від мінімального до максимального значення відбувається зміна положення мінімуму частотної залежності КСХН від кінцевої до початкової частоти генератора, що качає частоту (ГКЧ).

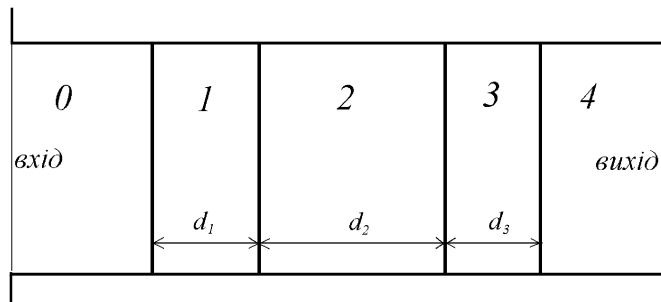


Рис. 1 Хвильовідний сенсор на основі прямокутного або круглого хвильоводу:

0 — незаповнений хвильовід; 1,3 — ізолюючі шари діелектрика з відомою проникністю; 2 — відрізок хвильоводу із зразком; 4 — короткозамикач, або узгоджений хвильовід

Шари 1 та 3 (рис.1) окрім функції ізолювання області 2 зі зразком речовини можуть виконувати функції трансформатора для зменшення КСХН і більш повного передавання потужності від генератора у досліджуваний зразок в деякому діапазоні частот. Кожний шар може бути змінений за розмірами додаванням додаткових пластин.

При аналізі хвильоводних сенсорів була використана модель багатократного перевідбиття певного типу хвилі від меж розділу шарів діелектриків. Для певної конструкції сенсора отримуються вирази частотної залежності комплексного коефіцієнта відбиття на основі формули для одного шару

$$R(f) = \frac{r_{01}(f) + R_{12}(f) \cdot \exp(-i \cdot 2h_1(f)d_1)}{1 + r_{01}(f) \cdot R_{12}(f) \cdot \exp(-i \cdot 2h_1(f)d_1)}, \quad (1)$$

де d — довжина відрізка; $h_i(f)$ — поздовжнє хвильове число у відповідному відрізку хвильоводу; $r_{mn}(f) = (h_m(f) - h_n(f)) / (h_m(f) + h_n(f))$ — наближене значення коефіцієнту відбиття від меж розділу mn (при наступних припущеннях: у прямокутному або циліндричному хвильоводі

розповсюджується одна хвиля H —типу, для усіх діелектричних матеріалів, що заповнюють осередок $\mu = 1$).

Вираз для коефіцієнта відбиття усієї структури будується послідовно, розпочинаючи з останньої межі: спочатку визначається $R_{34}(f)$, далі це значення підставляється у вираз для $R_{23}(f)$, яке підставляється у вираз для $R_{12}(f)$. Формула (1) є аналогом відомої формули для коефіцієнту відбиття від фрагмента лінії з навантаженням на кінці. Даний підхід продовжується для випадку часткового заповнення шару 2 (за умовою розповсюдження у цьому шарі лише одного основного типу хвилі), що дозволяє оцінити зміну частотних властивостей сенсору при зміні діелектричного заповнення.

При частковому заповненні шару 2 (рис. 2) зв'язок між поперечним хвильовим числом h та КДП зразка визначається з трансцендентних рівнянь (2), (3), (4), які отримуються із задоволення граничних умов для компонент певного типу хвилі на межах розділу середовищ.

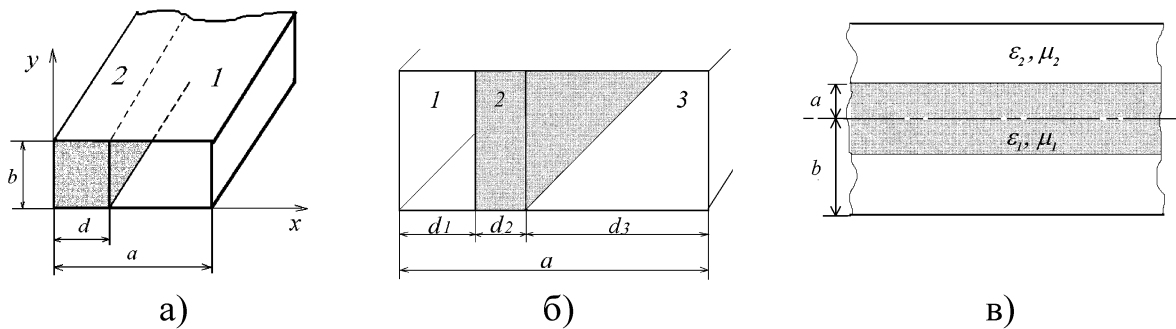


Рис. 2 Часткове заповнення хвильоводів:

а, б) прямокутний на моді H_{10} ; в) циліндричний на моді EH_{11}

Для прямокутного хвильоводу з двома шарами (рис. 2, а) на моді H_{10} використовується рівняння

$$\begin{aligned} & \mu_1 \cdot \sqrt{k_2^2 - h^2} \cdot \sin(\sqrt{k_1^2 - h^2} \cdot (a-d)) \cdot \cos(\sqrt{k_2^2 - h^2} \cdot d) + \\ & + \mu_2 \cdot \sqrt{k_1^2 - h^2} \cdot \sin(\sqrt{k_2^2 - h^2} \cdot d) \cdot \cos(\sqrt{k_1^2 - h^2} \cdot (a-d)) = 0 ; \end{aligned} \quad (2)$$

для прямокутного з трьома шарами (рис. 2, б) — рівняння

$$\begin{aligned} & \chi_1 \cdot \chi_3 \cdot \cos(\chi_1 \cdot d_1) \cdot \sin(\chi_2 \cdot d_2) \cdot \cos(\chi_3 \cdot d_3) + \\ & + \chi_2 \cdot \chi_3 \cdot \sin(\chi_1 \cdot d_1) \cdot \cos(\chi_2 \cdot d_2) \cdot \cos(\chi_3 \cdot d_3) + \\ & + \chi_1 \cdot \chi_2 \cdot \cos(\chi_1 \cdot d_1) \cdot \cos(\chi_2 \cdot d_2) \cdot \sin(\chi_3 \cdot d_3) - \\ & - \chi_2^2 \cdot \sin(\chi_1 \cdot d_1) \cdot \sin(\chi_2 \cdot d_2) \cdot \sin(\chi_3 \cdot d_3) = 0 \end{aligned} \quad , \quad (3)$$

де $\chi_i = \sqrt{k_i^2 - h^2} = \sqrt{(2\pi f / c)^2 \cdot \varepsilon_i - h^2}$;

для циліндричного металодіелектричного хвильоводу на моді EH_{11} (рис. 2, в) — рівняння

$$\frac{h^2}{a^2}(\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2)^2 - \left(\mu_1\chi_2^2 \frac{J_1'(\chi_1 a)}{J_1(\chi_1 a)} - \mu_2\chi_1^2 \frac{G_1'(\chi_2 a)}{G_1(\chi_2 a)} \right) \times$$

$$\times \left(\varepsilon_1\chi_2^2 \frac{J_1'(\chi_1 a)}{J_1(\chi_1 a)} - \varepsilon_2\chi_1^2 \frac{F_1'(\chi_2 a)}{F_1(\chi_2 a)} \right) = 0, \quad (4)$$

де $F_n = \frac{J_1(\chi_2 r)}{J_1(\chi_2 b)} - \frac{Y_1(\chi_2 r)}{Y_1(\chi_2 b)}$ — функція, що задовольняє умовам на поверхні

металевого циліндра для компонент поля E_z, E_φ ;

$G_n = \frac{J_1(\chi_2 r)}{J_1'(\chi_2 b)} - \frac{Y_1(\chi_2 r)}{Y_1'(\chi_2 b)}$ — функція, що задовольняє умовам на поверхні

металевого циліндра для компонент поля H_z, H_φ ; J_1, Y_1 — циліндричні функції Бесселя та Неймана; J_1', Y_1', F_1', G_1' — похідні по радіусу відповідних функцій.

Отримані комплексні значення h на сітці значень ε та $tg\delta$ при певному значенні частоти, апроксимуються сплайнами та використовуються для подальших розрахунків.

Значення діелектричної проникності у деякому околі певної частоти визначається рішенням системи рівнянь

$$\left| R_{1,mod}(\varepsilon', \varepsilon'', f_{1,вим}, d) \right| = \frac{S_{1,вим} - 1}{S_{1,вим} + 1}, \quad \left| R_{2,mod}(\varepsilon', \varepsilon'', f_{2,вим}, d) \right| = \frac{S_{2,вим} - 1}{S_{2,вим} + 1}, \quad (5)$$

де $S_{1,вим}, S_{2,вим}$ — значення КСХН у близьких точках $f_{1,вим}, f_{2,вим}$ частотної залежності, отримані у результаті вимірювань; $R_{1,mod}, R_{2,mod}$ — коефіцієнти відбиття з моделі.

Положення мінімумів модуля коефіцієнта відбиття, КСХН, або модуля коефіцієнта передачі однозначно пов'язані з параметрами зразка і повздовжним хвильовим числом у фрагменті із зразком (рис. 3). При низьких втратах у зразку мінімуми гострі, максимальне значення КСХН сягає великих значень, що призводить до великої похибки визначення проникності на деяких ділянках частотної залежності. Зі збільшенням втрат у зразку розмах пульсацій частотної залежності зменшується, що призводить до труднощів визначення екстремумів та необхідності застосування повних залежностей при порівнянні зразків. Так, наприклад, для короткозамкненого сенсору можна визначити наближене положення мінімумів із рівняння

$$\operatorname{Re}(h(f, \varepsilon, \dots) \cdot d) = \frac{\pi}{2} + \pi \cdot (n - 1), \quad (6)$$

де n — номер мінімуму; для сенсору з узгодженим навантаженням на кінці положення мінімумів визначається рівнянням

$$\operatorname{Re}(h(f, \varepsilon, \dots) \cdot d) = \pi \cdot n. \quad (7)$$

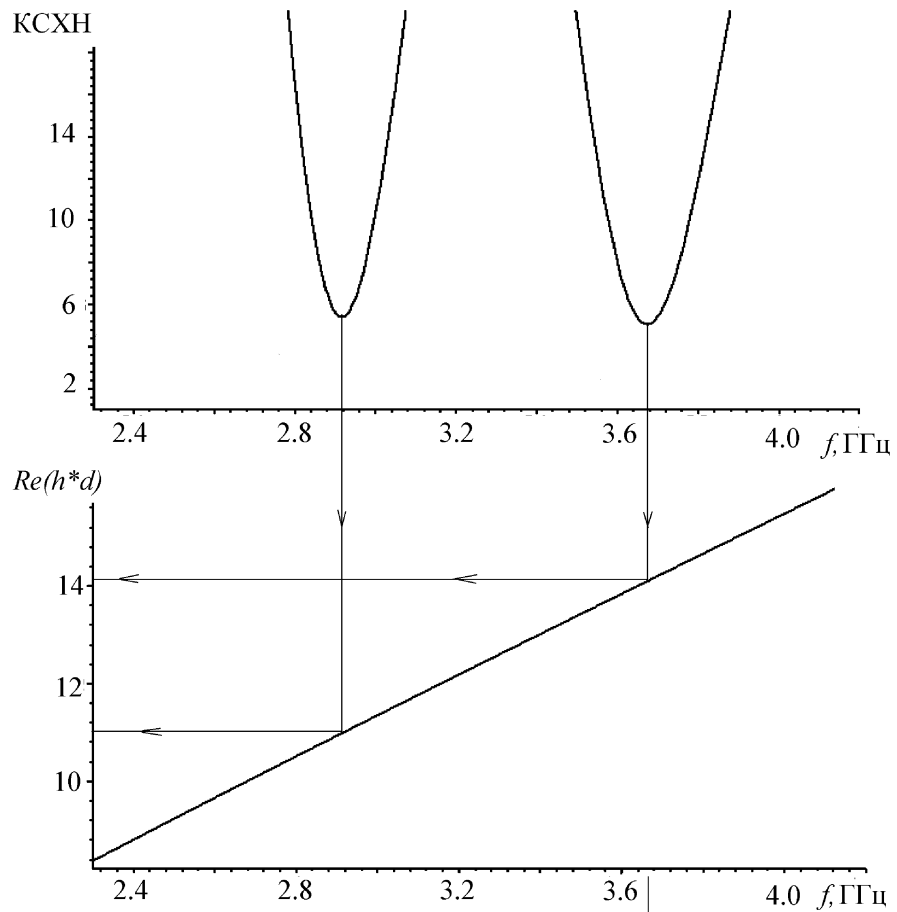


Рис. 3 Зв'язок між положенням мінімумів частотної залежності КСХН та повздовжним хвильовим числом у фрагменті із зразком

Для кожного сенсору можна побудувати наближені залежності положення мінімумів КСХН від діелектричної проникності зразка подібні (рис. 4)

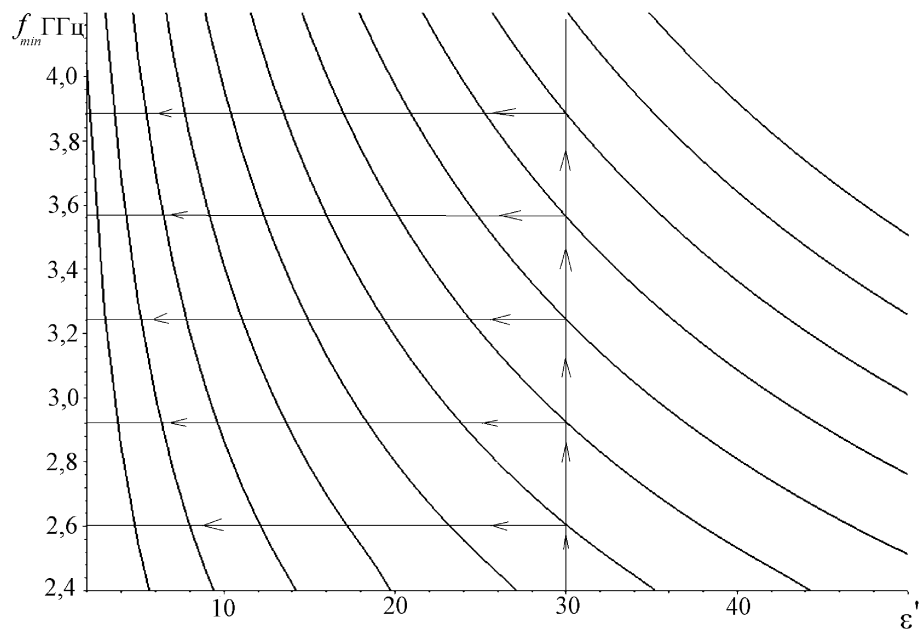


Рис. 4 Наближене положення мінімумів частотної залежності КСХН від наближення діелектричної проникності

Проектування вимірювального фрагменту хвильоводу здійснюється таким чином, щоб при заповненні зразком з мінімальною проникністю перший мінімум частотної залежності КСХН знаходився біля максимальної частоти діапазону ГКЧ, а при заповненні зразком з максимальною проникністю — біля мінімальної частоти.

Формулюються умови рішення такої задачі:

$$h(f_2, \varepsilon_1, b) > \frac{m}{d}, \quad \left. \frac{\partial h(f, \varepsilon_1, \dots)}{\partial f} \right|_{f=f_2} > \frac{m/d}{f_2 - f_{kp}(\varepsilon_1)},$$

$$h(f_1, \varepsilon_2, b) < \frac{m}{d}, \quad \left. \frac{\partial h(f, \varepsilon_2, \dots)}{\partial f} \right|_{f=f_1} < \frac{m/d}{f_1 - f_{kp}(\varepsilon_2)}, \quad (6)$$

де f_2 - максимальна частота діапазону вимірювань,

f_1 - мінімальна частота діапазону вимірювань,

$\left. \frac{\partial h(f, \varepsilon_1, b)}{\partial f} \right|_{f=f_2}$ - крутизна частотної залежності дійсної частини

повдовжнього хвильового числа для певного типу заповнення,

$m = \text{Re}(h(f_{\min}, \varepsilon, b) \cdot d)$ - значення фази у фрагменті із зразком, при якій спостерігається мінімум.

При проведенні вимірювань діелектричної проникності (ДП) по положенню мінімумів частотної залежності КСХН в якості першого наближення обирається таке значення ДП, при якому положення мінімумів теоретичної залежності (рис. 4) найбільш близько до вимірюваних значень частоти мінімумів. Надалі значення ДП уточнюється рішенням системи рівнянь (5), або більш строгим чисельним методом.

Для підвищення точності визначення ε необхідно підвищувати точність відліку частот та КСХН, що досягається калібруванням генераторів по частоті на більшій кількості точок відліку частоти, калібруванням детекторів за потужністю (визначенням параметрів моделі детектора на різних частотах і рівнях потужності).

У третьому розділі теоретично обґрунтовується вплив параметрів діелектричного заповнення порожнини резонатора на чутливість резонансної частоти до зміни параметрів зразка. Також наводяться рекомендації до методики вдосконалення резонаторних сенсорів, щоб при зміні діелектричної проникності від мінімального до максимального значення відбувалась зміна положення максимуму частотної залежності модуля коефіцієнта передачі від кінцевої до початкової частоти генератора, що качає частоту (ГКЧ).

Зв'язок між резонансною частотою та параметрами діелектричного заповнення визначається із трансцендентних рівнянь, які отримуються із задоволення граничних умов на межах розділу шарів для розподілу поля, характерного для певної моди. Так для кожного випадку заповнення (Рис 5 а, б, в) можна отримати низку рівнянь для декількох основних мод.

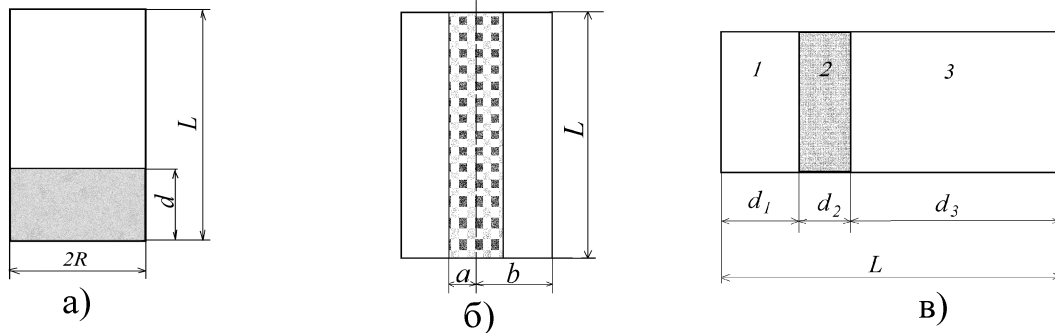


Рис. 5. Варіанти заповнення вимірювальних резонаторів

Для мод H_{111} , H_{011} циліндричного резонатора (рис. 5, а) було використано рівняння

$$h_1 \cos(h_1(L-d))\sin(h_2d) + h_2 \sin(h_1(L-d))\cos(h_2d) = 0 . \quad (7)$$

для моди E_{010} циліндричного резонатора (рис. 5, б) — рівняння

$$\varepsilon_1 \cdot J_1(k_1a) \cdot \left(\frac{J_0(k_2a)}{J_0(k_2b)} - \frac{Y_0(k_2a)}{Y_0(k_2b)} \right) - \varepsilon_2 \cdot J_0(k_1a) \cdot \left(\frac{J_1(k_2a)}{J_0(k_2b)} - \frac{Y_1(k_2a)}{Y_0(k_2b)} \right) = 0 , \quad (8)$$

для мод H_{111} , H_{011} циліндричного або H_{101} прямокутного резонатора (рис. 5, в) — рівняння

$$h_1 \cdot h_3 \cdot \cos(h_1a) \cdot \sin(h_2b) \cdot \cos(h_3d) + h_2 \cdot h_3 \cdot \sin(h_1a) \cdot \cos(h_2b) \cdot \cos(h_3d) + h_1 \cdot h_2 \cdot \cos(h_1a) \cdot \cos(h_2b) \cdot \sin(h_3d) - h_2^2 \cdot \sin(h_1a) \cdot \sin(h_2b) \cdot \sin(h_3d) = 0 . \quad (9)$$

Чисельне розв'язання цих рівнянь дозволяє знаходити зв'язок між резонансними частотами сенсорів та комплексною діелектричною проникністю зразка в певному діелектричному заповненні.

При певних рівнях наповненості та значеннях ДП у спостерігаємому діапазоні частот з'являються додаткові резонанси, які відповідають вищим кореням, що дозволяє визначати проникність зразків, коли основний (з найнижчою частотою) корінь виходить за межі існування моди або спостерігаємої смуги частот. Типова залежність коренів трансцендентного рівняння від ДП показана на рис. 6, а. На рис. 6, б показано поява додаткового кореня (крива 2), який також буде спостерігатися у вигляді додаткової резонансної кривої на частотній залежності модуля коефіцієнта передачі.

На рис. 7 показано залежність модуля лівої частини рівняння від частоти при певному значенні проникності. Можна побачити зміну положення коренів (нулі), їх чутливість до зміни проникності та уточнити області пошуку відповідного кореня.

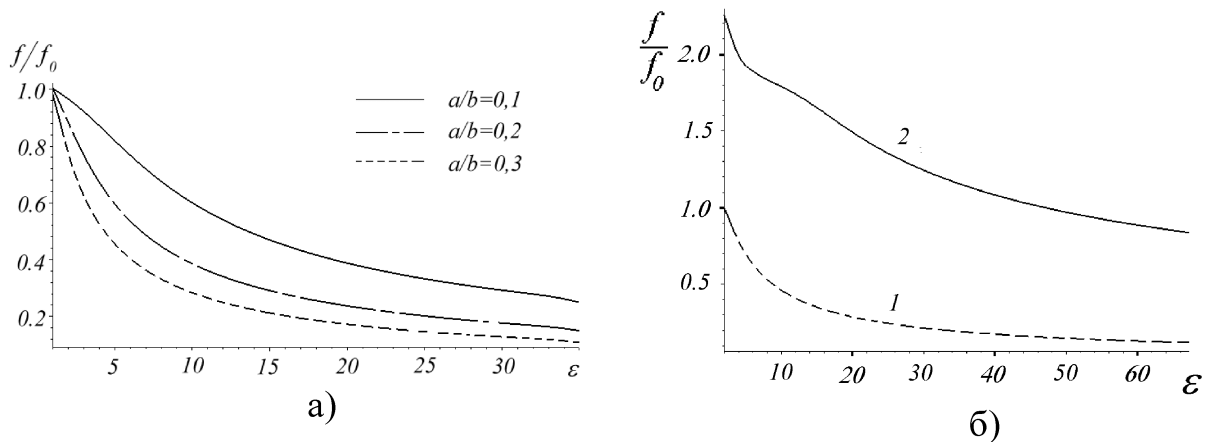


Рис. 6 Відношення дійсної частини кореня рівняння к частоті пустого резонатора для моди H_{111} циліндричного резонатора:
 а) залежності для різних параметрів заповнення; б) поява додаткового кореня

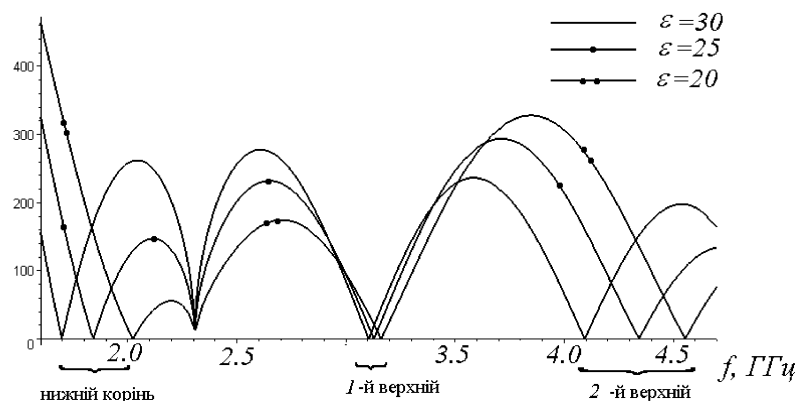


Рис. 7. Зсув коренів (мінімуми) рівняння при зміні проникності від 20 до 30 (по вісі ординат – значення модулю лівої частини рівняння (7)).

Для певного випадку заповнення (наприклад: циліндричний резонатор з шарами: $d_1 = 5$ мм, $d_2 = 5$ мм, $L = 80$ мм, $R = 25$ мм, області 1,3-фторопласт $\epsilon = 2.0$) для моди H_{111} за результатами рішення трансцендентного рівняння (9) можна отримати відповідні корені (наприклад таблиця 1).

Таблиця 1

Дійсна та уявна частина резонансної частоти (1-й верхній додатковий корінь)

$tg\delta \backslash \epsilon'$	10		20		30		40	
0,001	2910,1	0,28	2790,8	0,1	2761,0	0,057	2746,7	0,04
0,01	2910,1	2,8	2790,8	0,95	2761,0	0,57	2746,7	0,44
0,1	2906,6	28,0	2789,7	9,4	2760,4	5,6	2746,4	4,32
0,2	2896,4	54,0	2786,4	18,0	2758,7	10,8	2745,3	8,4

Для отриманих рішень будуються залежності $f' = F_1(\varepsilon, tg\delta)$, $Q = F_2(\varepsilon, tg\delta)$, які можна використовувати для швидкої діагностики параметрів діелектричного матеріалу по значенню резонансної частоти та добротності вимірювального осередку.

Таким чином, математична модель вимірювального резонатора складається з набору коренів трансцендентних рівнянь для основних мод, які збуджуються у резонаторі в діапазоні частот, в якому проводиться дослідження.

При побудові градуовальної характеристики задається значення проникності та здійснюється пошук комплексних коренів трансцендентних рівнянь у всьому доступному діапазоні частот, що дозволяє визначати корні, частота яких може бути вище частоти основної (нижчої) моди резонатора, на якій проводяться вимірювання.

Для зміни чутливості, або розширення діапазону вимірюваної проникності пропонується заповнювати пусту область резонатора діелектричним матеріалом з відомою діелектричною проникністю (наприклад фторопласт, текстоліт, кераміка). При розробці, або вдосконаленні резонансного сенсора на певний діапазон частот (від f_H до f_B) і проникностей (від ε_{\min} до ε_{\max}) пропонується використовувати цільову функцію подібну

$$F = (f(\varepsilon_{\max}, d_i, \varepsilon_i, L...) - f_H)^2 + (f(\varepsilon_{\min}, d_i, \varepsilon_i, L...) - f_B)^2, \quad (10)$$

де d_i, ε_i — розмір та проникність шару діелектричного заповнення, L — розміри резонатора; $f(\varepsilon_{\max}, d_i, \varepsilon_i, L...)$ — резонансна частота певної моди. Добором варіантів заповнення визначаються геометричні розміри та ДП вставки.

Результати, які наведені в третьому розділі, опубліковано у працях [4, 5, 6, 15].

У четвертому розділі пропонується вдосконалення методів діагностики параметрів діелектриків на основі аналізу ЧЗ КСХН або послаблення.

Існує два розгалуження діагностики – визначення КДП та визначення неелектричних параметрів. Методика діагностики, що пропонується, складається з етапів калібрування та діагностики. На етапі калібрування (навчання):

1. Для зразків стандартної форми (циліндри або паралелепіпеди фіксованих розмірів) з відомими параметрами, які розміщуються у вимірювальному осередку, формується база даних з низки ЧЗ КСХН або послаблення.

2. Із отриманих дискретних залежностей формується набір інформаційних ознак (положення мінімумів, максимумів, значення у певних

точках, крутизна на певній ділянці) та визначається зв'язок між досліджуваним параметром та ознаками вимірюваних ЧЗ тракту.

3. Будуються градувальні характеристики сенсору (дискретні, або безперервні, які визначаються за методами інтерполяції).

На етапі діагностики для досліджуваного зразка визначається частотна залежність КСХН або послаблення, виділяються ознаки та по відомим градувальним залежностям визначається досліджуваний параметр, або приналежність зразка до певного класу.

Якщо ознаки нечіткі, значення вишукуваного параметра діелектрика визначається порівнянням за методом найменших квадратів відомої частотної залежності КСХН або послаблення з залежністю, що отримується при підстановці значення проникності у модель, тобто задача приводиться до задачі пошуку мінімуму цільової функції.

Наприклад, в якості цільової функції для хвильоводних сенсорів використовуємо функції

$$D_1 = \sum_{i=1}^N (S_{вим}(f_i) - S_{модел}(f_i))^2, \quad (11)$$

де $S(f_i)$ - значення КСХН на сітці частот, отримані в результаті вимірювань та із моделі для певного значення ДП; N - кількість відліків частоти у робочому діапазоні генератора;

$$D_2 = \left(\frac{f_{1,вим} - f_{1,мод}}{f_{1,вим}} \right)^2 + \left(\frac{f_{2,вим} - f_{2,мод}}{f_{2,вим}} \right)^2 + \left(\frac{S_{1,вим} - S_{1,мод}}{S_{1,вим}} \right)^2 + \left(\frac{S_{2,вим} - S_{2,мод}}{S_{2,вим}} \right)^2, \quad (12)$$

де - f_1, f_2 - частоти сусідніх мінімумів, S_1, S_2 - значення КСХН на відповідних частотах. Основний вплив на положення мінімуму по частоті оказує дійсна частина ДП, а на значення КСХН у мінімумі – уявна частина ДП.

Пропонується визначати положення мінімуму з використанням інтерполяційного полінома $y = a_3 f^3 + a_2 f^2 + a_1 f + a_0$, який описує частотну залежність КСХН в окілї мінімуму. Коефіцієнти полінома визначаються з системи рівнянь для чотирьох точок частотної залежності (2 точки — зправа та 2—зліва від мінімуму). Положення мінімуму відповідає одне з двох

$$\text{значень } f_{\min} = \frac{-2a_2 \pm \sqrt{4a_2^2 - 12a_3a_1}}{6a_3}.$$

Ознаки резонансної кривої (частота максимуму f_i , послаблення у максимумі A_i , ширина резонансу на рівні -3 дБ від вершини Δf_i) визначаються на основі аналізу нормованої залежності перехідного послаблення вимірювального осередку. Оскільки частотна залежність

перехідного послаблення містить декілька резонансів, формується набір ознак, що відповідає певним параметрам зразка (таблиця 2).

Таблиця 2

Набір ознак частотної залежності послаблення резонатора

№ зразка	Ознаки резонансів									Клас зразка
	1-й резонанс			2-й резонанс			N-й резонанс			
	f_1	A_1	Δf_1	f_2	A_2	Δf_2	f_N	A_N	Δf_N	

При зростанні діелектричної проникності зразка спостерігається поява додаткових резонансів, які складно передбачити теоретично. Деякі резонанси, які теоретично існують, навпаки можуть не спостерігатися, що значно ускладнює діагностування.

Для повного опису положення мінімумів пропонується використовувати поліном вигляду

$$P_k = |(f - f_{1,k}) \cdot (f - f_{2,k}) \cdot \dots \cdot (f - f_{n,k})|, \quad (13)$$

де $f_{i,k}$ — значення резонансної частоти i -го резонансу на частотній залежності КСХН або послаблення k -го зразка.

Виділення ознак окремого резонансу може бути здійснено по трьом точкам резонансної кривої з системи рівннів

$$y_1 = \frac{P}{\sqrt{((2\pi f_i)^2 - f_{01}^2)^2 + 4\delta^2 f_{01}^2}}, y_2 = \frac{P}{\sqrt{((2\pi f_i)^2 - f_{02}^2)^2 + 4\delta^2 f_{02}^2}},$$

$$y_3 = \frac{P}{\sqrt{((2\pi f_i)^2 - f_{03}^2)^2 + 4\delta^2 f_{03}^2}}, \quad (14)$$

яка вирішується чисельно, відносно невідомих f_i, δ, P ,

де y_i — амплітуда резонансної кривої на частоті f_{0i} ; P — амплітуда максимуму кривої; δ — параметр, пов'язаний з добротністю.

На етапі калібрування для ряду зразків з відомими параметрами формується ряд поліномів вигляду (13). На етапі досліджень виконується висновок о приналежності зразка к певному класу по мінімуму функції

$$D_k = \sum_{i=1}^N P_k(f_i), \quad (15)$$

де f_i — резонансні частоти, отримані в результаті вимірювань для зразка з невідомими параметрами.

На рис. 8 показана якісна залежність між параметром, по якому проводиться сортування (діелектрична проникність, вологість, концентрація...), та кількістю і положенням спостережуваних резонансів.

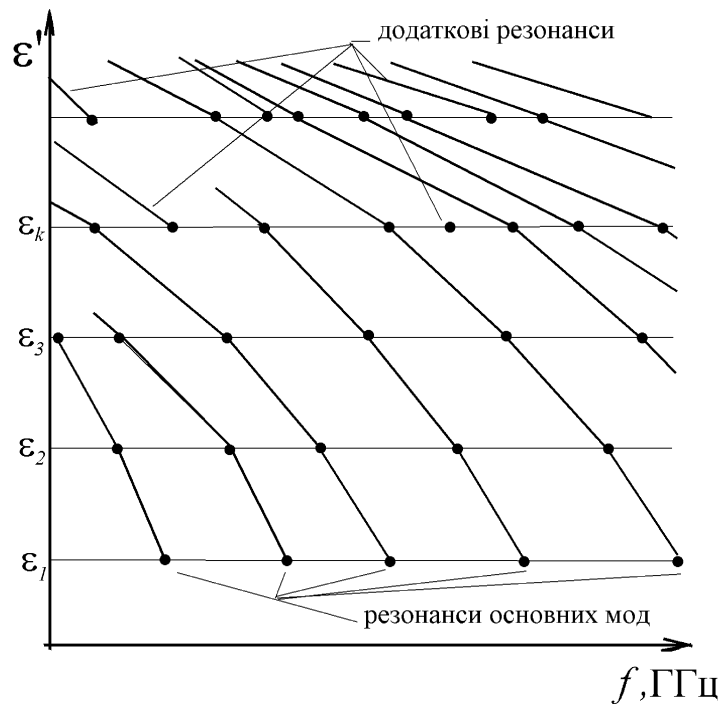


Рис. 8. Набір резонансів $f_{i,k}$ (точки) для певних значень параметрів

Використання поліному (13) та цільової функції (12) дозволяє проводити діагностування по неповному набору резонансів, тобто у випадку, коли розраховується лише частина резонансів, або вимірювання проводиться у більш вузькій смузі частот, ніж калібрування.

Результати, які наведені в четвертому розділі, опубліковано у працях [1, 2, 3, 7, 8, 9].

У *п'ятому розділі* наводяться результати експериментальної перевірки теоретичних положень роботи, схеми вимірювальних установок, результати вимірювань та статистичної обробки для діелектричної проникності світлих нафтопродуктів, товарного вугілля, та інших речовин.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну науково-прикладну задачу вдосконалення пристроїв та методів дослідження параметрів діелектриків з втратами за рахунок використання багаторезонансних хвильовідних та резонаторних сенсорів, внутрішнє заповнення яких може змінюватись для зміни чутливості до діелектричної проникності зразка. В роботі вирішено задачі по визначенню впливу типу сенсора, варіанту положення, розмірів та форми зразка, діелектричних параметрів речовини на ознаки вимірюваних параметрів хвильоводних трактів.

У роботи одержані наступні наукові та прикладні результати:

1. Дістала подальший розвиток теорія синтезу хвильоводних та резонаторних сенсорів з частковим заповненням за рахунок обору оптимального рівня заповнення та розміщення у пустих областях якісного діелектрика для отримання певної чутливості сенсора.

2. Вперше запропоновано метод виділення та порівняння ознак частотних залежностей КСХН або послаблення для вимірювання параметрів діелектричних матеріалів.

3. Вперше запропоновано розпізнавання зразка діелектрика по набору резонансів, які розраховуються для резонансного вимірювального осередку. Запропоновано опис еталонів діелектриків у вигляді поліномів, до яких входять усі резонансні частоти, що спостерігаються. Положення деяких окремих резонансів отримується шляхом розв'язання низки рівнянь, які є моделями сенсорів з частковим заповненням діелектриком з втратами. При співпаданні резонансів, що розраховані при підстановці наближення проникності, з резонансами, що відповідають еталону, значення модулю поліному буде мінімальним.

4. Дістала подальшого розвитку методика побудови теоретичних калібрувальних залежностей між комплексною діелектричною проникністю зразка та параметрами частотних характеристик КСХН або перехідного послаблення хвильоводних та резонаторних вимірювальних осередків для різних рівнів заповнення.

Результати досліджень були впроваджені в практику робіт Дніпропетровського регіонального державного науково-технічного центра метрології, стандартизації та сертифікації та державного підприємства КБ „Південне” імені М.К.Янгеля.

ПЕРЕЛІК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бухаров С.В. Определение диэлектрической проницаемости веществ волноводным и резонансным методами. / С. В. Бухаров, В. В. Овсяников, В.Я. Василенко, В. В. Коцур. // Вісник Дніпропетровського державного університету. Фізика. Радіоелектроніка. —1998. —Вип. 3,—т.2. — С.117—121.

2. Бухаров С.В. Исследование диэлектрической проницаемости жидких нефтепродуктов радиофизическим методом. / С. В. Бухаров // Вісник Дніпропетровського університета. Фізика. Радіоелектроніка/ — Вип. 6, — 2000. — С. 148—152.

3. Бухаров С.В. Экспресс-контроль качества нефтяных моторных топлив. / С. В. Бухаров, В. В. Овсяников, В. М. Попель, В. П. Маматов // Журнал Технологические системы. — Киев.— 2003. — №4(20).— С. 63—66.

4. Бухаров С.В. Измерение диэлектрической проницаемости веществ методом частичнозаполненного резонатора. / С. В. Бухаров // Радиотехника. — Вып. 140.— 2005. — Харьков: ХНУРЭ. — С. 104—107.

5. Бухаров С.В. Измерение диэлектрической проницаемости цилиндрических образцов резонаторным методом. / С. В. Бухаров // Вісник Дніпропетровського національного університета. Фізика. Радіоелектроніка. — Выпуск 12. — 2007. — С. 26—29.

6. Бухаров С.В. Расчет параметров частично заполненного резонатора при измерении диэлектрической проницаемости. / С. В. Бухаров // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — № 6.— 2007.— Киев — С. 77—80.

7. Бухаров С.В. Діагностика параметрів якості вугілля і рідких нафтопродуктів електромагнітними методами./С.В. Бухаров, Вол.Вікт. Овсяніков// Вісник НТУ "Київський політехнічний інститут" Серія-Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — Київ: КПІ, 2011.— Вип. 45. — С 120—130.

8. Патент UA 52749 Україна, МКІ 6G01N 33/22 Спосіб вимірювання октанових та цетанових чисел рідких нафтових палив. / С. В. Бухаров, В. В. Овсяніков // Заявл. 10.12.99; Опубл. 15.01.03. Бюл. №1.

9. Патент UA 71301A Україна, МКІ 7G01N 22/00 Спосіб експрес-контролю якісних характеристик речовин у НВЧ діапазоні. / С. В. Бухаров, Вол. Вікт. Овсяніков, Вікт. Вол. Овсяніков //Заявл. 18.12.03.; Опубл. 15.11.04. Бюл. №11.

10. Патент UA 77966 Україна, МКІ 6G01N 22/00 Спосіб експрес-контролю октанових та цетанових чисел рідких нафтових палив. / С. В. Бухаров, В. П. Маматов, Вол. Вікт. Овсяніков, Вікт. Вол. Овсяніков //Заявл. 15.09.2005.; Опубл. 15.02.2007, Бюл. №2.

11. Buharov S.V. Investigation of the Complex Permittivity of Coals and Oil Products by the Radiophysical Methods / S. V. Buharov, A. G. Hundriga, V. V. Ovsianikov, I. V. Petrusenko // Proc. of III rd Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques. — Sevastopil, —Sept. 8—11. — 1999. — P.541—543.

12. Buharov S.V. Solution of the Direct and Inverse problems of the wave reflection from the waveguide fragment filled with a loss dielectric. / S. V. Buharov // Proc. Of the 8—tn Int. Conf. on Math.Methods in Electromagnetic Theory. —Sept. 12-15.—2000.— Kharkiv. — vol. 2.—P. 583—586.

13. Buharov S.V. To a problem of analysis of dielectric rod antennas. / S. V. Buharov // Proc. Of the 2002 International Conference on mathematical methods in electromagnetic theory. — Sept. 10—13. — 2002. — Kiev. — Vol. 2. — P. 443—446.

14. Buharov S.V. To a problem of analysis of dielectric rod radiator. / S. V. Buharov // Proc. of IV-rd Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques. — Sevastopol. — Sept. –9-12. — 2003. — Vol. 2. —P. 499—500.

15. Бухаров С.В. Измерение диэлектрической проницаемости веществ методом частично-заполненного резонатора / С. В. Бухаров// Proc. Of Int. conf. CriMiCo 2004. — Sevastopol. —Sept. 13—17. — 2004. — P. 678—679.

АНОТАЦІЯ

Бухаров С.В. Вдосконалення мікрохвильових пристроїв та методів дослідження параметрів діелектричних речовин. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 — антени та пристрої мікрохвильової техніки. — Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, 2012.

Вирішується актуальна науково-прикладна задача вдосконалення пристроїв та методів мікрохвильової діагностики параметрів діелектричних матеріалів.

Дістала подальший розвиток теорія синтезу хвильоводних та резонаторних сенсорів з частковим заповненням за рахунок вибору оптимального рівня заповнення та розміщення у пустих областях якісного діелектрика для отримання завданої чутливості сенсора. Запропоновано метод виділення та порівняння ознак частотних залежностей КСХН або послаблення для вимірювання параметрів діелектричних матеріалів. Запропоновано розпізнавання зразка діелектрика по набору резонансів, які розраховуються для резонансного вимірювального осередку. Запропоновано опис еталонів діелектриків у вигляді поліномів, до яких входять усі резонансні частоти, що спостерігаються. Дістала подальшого розвитку методика побудови теоретичних калібрувальних залежностей між комплексною діелектричною проникністю зразка та параметрами частотних характеристик КСХН або перехідного послаблення хвильоводних та резонаторних вимірювальних осередків для різних рівнів заповнення.

Ключові слова: пристрої для мікрохвильової діагностики, діелектрична проникність, корені трансцендентних рівнянь, хвильовідні та резонаторні сенсори, часткове заповнення, розпізнавання зразка.

АННОТАЦИЯ

Бухаров С.В. Усовершенствование микроволновых устройств и методов исследования параметров диэлектрических веществ. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – антенны и устройства микроволновой техники.- Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

Решается актуальная научно-прикладная задача усовершенствования микроволновых устройств и методов для исследования параметров диэлектрических материалов.

Получила дальнейшее развитие теория синтеза волноводных и резонаторных сенсоров с частичным заполнением путем оптимального выбора уровня заполнения и размещением в пустых областях диэлектрических вставок из материала с известной проницаемостью для получения требуемой чувствительности сенсора. Использована модель резонаторной ячейки в виде набора трансцендентных уравнений для основных мод резонатора. Предложен метод выделения и сравнения признаков частотных зависимостей КСВН и переходного ослабления для измерения параметров диэлектрических материалов. Усовершенствован волноводный метод определения комплексной диэлектрической проницаемости по положению мнимой частотной зависимости КСВН. Предложен метод распознавания образца диэлектрика по набору резонансов измерительной ячейки. Предложено описание эталонов диэлектриков в виде полиномов, в которые входят все наблюдаемые резонансные частоты. Получила дальнейшее развитие методика построения теоретических калибровочных зависимостей между комплексной диэлектрической проницаемостью и измеряемыми параметрами волноводного тракта. параметр

Полученные соотношения позволяют проектировать волноводные и резонаторные сенсоры с частичным заполнением для заданного диапазона измерения диэлектрической проницаемости в заданном диапазоне частот.

Ключевые слова: устройства микроволновой диагностики, корни трансцендентных уравнений, волноводные и резонаторные сенсоры, частичное заполнение, распознавание образца.

ABSTRACT

Bukharov S.V. The microwave devices and methods improvement for the dielectric parameters investigations. Manuscript.

Thesis for candidate's degree in technical sciences on specialty 05.12.07 — Antennas and devices of the microwave technique. Kharkiv national university of radioelectronics, Kharkiv, 2012.

The thesis considers the actual scientifically-applied task of development of the microwave diagnostics technology of the dielectric materials parameters determination. It extends possibilities of the automated devices creation for the quality control of materials of the radio electronic, chemical, food industries.

The approximate model of the waveguide cells with the partial filling on the basis of frequent reflections is improved. Different methods of the segment of waveguide including were considered. The partial filled resonators models on the basis of the complex transcendent equation is developed. The roots of transcendent equations are explored, calibrating dependences for different levels of filling are built.

The parameters diagnostics approach by the special points of the VSWR or transitional losses frequency dependences of measuring cell is offered and developed.

Keywords: microwave devices for diagnostic, transcendent equations, waveguide and resonator sensors, partial filling, the dielectric parameters, recognition by the VSWR or losses frequency dependence.

Підписано до друку 10.05. 2012р.
Формат 60*84/16 Папір друкарський. Ум. др.арк.1
Друк різнограф. Замовлення №4/12. Наклад – 100 прим.
Національна металургійна академія України
49005, Дніпропетровськ,
пр. Гагаріна,4
st@dmegi.dp.ua