

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ РАДАРНИМ МЕТОДОМ

В. П. Куценко, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ,

О. П. Яненко, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ,

С. П. Сергієнко, кандидат фізико-математичних наук, доцент,
Донецький національний університет, м. Вінниця,

К. Л. Шевченко, кандидат технічних наук, доцент,

Київський національний університет технології та дизайну, м. Київ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ РАДАРНЫМ МЕТОДОМ

В. П. Куценко, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск,

А. П. Яненко, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев,

С. П. Сергиенко, кандидат физико-математических наук, доцент, Донецкий национальный университет, г. Винница,

К. Л. Шевченко, кандидат технических наук, доцент, Киевский национальный университет технологии и дизайна, г. Киев

MODELING NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIAL PROPERTIES RADAR METHOD

V. P. Kutsenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Donetsk National Technical University, Donetsk,

O. P. Yanyenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, National technical university of Ukraine «KPI», Kyiv,

S. P. Sergienko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Donetsk National University, Vinnitsa,

K. L. Shevchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv

У статті розроблено еквівалентну схему та узагальнено математичну модель, що обґрунтовують фізичні основи радарного неруйнівного контролю властивостей матеріалів і методи перетворення сигналів виміральної інформації. Результати математичного моделювання і експериментальних перевірок процесів неруйнівного контролю підтвердили, що зміна властивостей матеріалів призводить до зміни їх характеристичного хвильового опору і є основою для контролю властивостей матеріалів. Результати моделювання та експериментальних досліджень корелюють між собою, що підтверджується адекватністю розробленої моделі з результатами експериментальних вимірювань.
Ключові слова: неруйнівний контроль, вимірювання, властивості матеріалів, моделювання, радарний метод.

В статье разработаны эквивалентная схема и обобщенная математическая модель, обосновывающие физические основы радарного неразрушающего контроля свойств материалов и методы преобразования сигналов измерительной информации. Результаты математического моделирования и экспериментальных проверок процессов неразрушающего контроля подтвердили, что изменение свойств материалов приводит к изменению их характеристического волнового сопротивления и является основой для контроля свойств материалов. Результаты моделирования и экспериментальных исследований коррелируют между собой, что подтверждается адекватностью разработанной модели с результатами экспериментальных измерений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, измерение, свойства материалов, моделирование, радарный метод.

To evaluate the use of radar microwave nondestructive methods of control parameters of dielectric materials modeling process conducted by the example of the presence of air bubbles in the sample, a model of the structure indicating the electromagnetic parameters of both the material and the inclusion of defective and defect size, distance, location relative to walls. The problem is solved by the method of equivalent circuits, which in terms of the energy to be presented as a series parallel connection RLC circuits, reflecting the formation and passage of external probing electromagnetic energy that carries information about the properties of dielectric materials in the control. It is shown that the developed equivalent circuit and mathematical modeling of physical fundamentals justify radar NDT methods and signal conversion measurement data.

Keywords: Non-Destructive Testing, Measurement, Material properties, Modeling, Radar Method.

ВСТУП

Для неруйнівного контролю властивостей діелектричних матеріалів застосовують мікрохвильові радіометричні системи, що працюють за радарним методом. Відомо, що під час досліджень матеріали впливають на проходження, відбиття, поглинання та розсіювання електромагнітних НВЧ-хвиль. За ступенем зміни їхніх параметрів можна зробити висновок щодо характерних властивостей самого матеріалу, а також щодо відхилів їх від номінальних значень [1—5].

Однак є об'єкти, неруйнівний контроль властивостей яких необхідно проводити на рівнях, близьких до рівня власного випромінювання в ближній зоні, щоб врахувати вплив їхнього власного електромагнітного поля, інтенсивність якого може змінюватися під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх чинників. Це потребує застосування високочутливих ($1 \times 10^{-12} \dots 1 \times 10^{-15}$ Вт) модуляційних радіометричних систем [6].

Таким чином, для дослідження процесу неруйнівного контролю властивостей матеріалів радарним методом актуальною є проблема удосконалення теорії НВЧ ближньопольової діагностики, яка охоплює розроблення еквівалентних схем і узагальнення математичних моделей для обґрунтування фізичних основ контролю та методів перетворення сигналів виміральної інформації та їх оброблення. Тому для коректного опису необхідно застосувати математичне моделювання та обчислювальні методи.

Метою роботи є розроблення еквівалентної схеми та узагальненої математичної моделі для обґрунтування фізичних основ радарного неруйнівного контролю і методів перетворення сигналів виміральної інформації.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Змінення властивостей діелектричних матеріалів майже завжди супроводжується зміненням фізико-механічних параметрів, і, відповідно, результатів взаємодії електромагнітних хвиль з ними [1], [2], [7—9]. У разі радарного НВЧ-контролю даних матеріалів важливе значення мають діелектрична стала ϵ і тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$.

Для оцінення використання радарних методів неруйнівного НВЧ-контролю параметрів діелектричних матеріалів проведено моделювання процесів на прикладі наявності в зразках повітряних бульбашок, побудовано модель їх структури із зазначенням електромагнітних параметрів як самого матеріалу, так і дефектних включень, а також розмірів дефекту, відстаней його розташування відносно стінок.

Поставлену задачу розв'язано за допомогою методу еквівалентних схем [9], який з погляду поширення енергії представлений як послідовно паралельне з'єднання RLC кіл, що відображають процес формування та проходження зовнішньої зондувальної електромагнітної енергії, яка несе інформацію щодо властивостей діелектричних матеріалів у зоні контролю (рис. 1).

На еквівалентній схемі (рис. 1) позначено R , L і C — активні втрати, індуктивні та ємнісні властивості матеріалу, відповідно; індекси позначають належність: 1 — до діелектричних матеріалів із властивостями, що відповідають нормі, 0 — до повітряних бульбашок, Γ_A — до джерела електромагнітних випромінень радарної системи, A — до приймальної антени, Z_σ , Z_c — характеристичний хвильовий опір відповідно навколишнього середовища та діелектричного матеріалу, $E_{\Gamma A}$ — зовнішнє джерело електромагнітного випромінювання.

Враховуючи послідовно паралельне з'єднання RLC -кіл еквівалентної схеми, складемо функцію для характеристичного хвильового опору Z_c діелектричного матеріалу в зоні контролю, яка набуде вигляду (1), де Z_σ , L_σ , C_σ — хвильовий опір, індуктивність та ємність повітряного включення (бульбашки); R_1 , L_1 , C_1 — активний опір, індуктивність та ємність діелектричного матеріалу; d_1 , d_3 — товщина матеріалу до і після бульбашки, де властивості матеріалу відповідають нормі; d_2 — розміри дефектного включення (бульбашки); ω — частота, на якій здійснюється неруйнівний контроль.

Замінімо у формулі (1) параметри еквівалентної схеми електричними параметрами матеріалу в зоні контролю, після перетворення одержимо вираз характеристичного хвильового опору Z_c діелектричного матеріалу в зоні контролю (2).

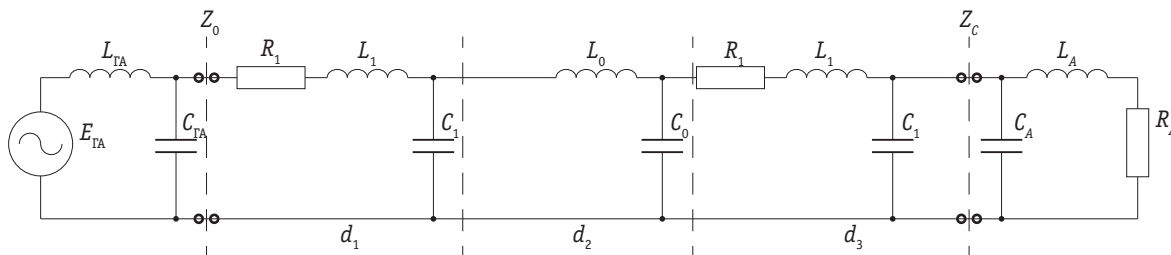


Рис. 1. Еквівалентна схема для моделювання процесу контролю дефектів структури діелектричних матеріалів радарним методом

$$Z_c(Z_0, R_1, L_0, L_1, C_0, C_1, d_1, d_2, d_3, \omega) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega C_0} + d_1 R_1 + j\omega d_1 L_1} + j\omega d_1 C_1} + j\omega d_2 L_0} + j\omega d_2 C_0} + R_1 d_3 + j\omega L_1 d_3} + j\omega C_1 d_3} \quad (1)$$

$$Z_c(Z_0, \text{tg}\delta, \varepsilon, d_1, d_2, d_3, X, \omega) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{Z_0} + d_1 \frac{Z_0}{\varepsilon} \text{tg}\delta + j d_1 \frac{Z_0}{\varepsilon}} + j\omega d_1 \frac{\varepsilon}{Z_0}} + j d_2 Z_0} + j \frac{d_2}{Z_0}} + \frac{Z_0}{\varepsilon} \text{tg}\delta d_3 + j \frac{Z_0}{\varepsilon} d_3} + j \frac{\varepsilon}{Z_0} d_3} \quad (2)$$

Далі знаходимо реальну частину функції характеристичного хвильового опору Z_c діелектричного матеріалу

$$Z_c(Z_0, \text{tg}\delta, \varepsilon, d_1, d_2, d_3, X, \omega) = \text{Re } Z_c(Z_0, \text{tg}\delta, d_1, d_2, d_3, X, \omega), \quad (3)$$

яка буде використана для розрахунку залежності зміни реальних значень хвильового опору матеріалу від розмірів повітряних бульбашок у структурі за норми та з бульбашками (рис. 2), що характеризує втрати енергії сигналу при проходженні через матеріал з дефектом [14].

Промодельюємо оцінювання властивостей матеріалу на прикладі залежності змін хвильового опору матеріалу від розмірів повітряних бульбашок в його структурі (рис. 2), що розраховане з використанням програми Mathcad 15 як відношення десятичного логарифму функцій, побудованих на основі (3), в одному випадку з параметрами матеріалу, що відповідає нормі, і в другому випадку за наявності в структурі повітряних бульбашок.

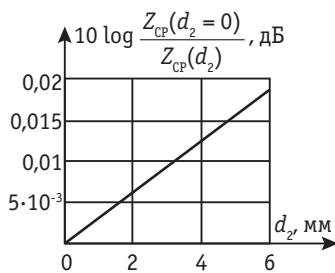


Рис. 2. Залежність змін хвильового опору матеріалу від розмірів повітряних бульбашок в його структурі

На основі функції (3) можна так само провести математичне моделювання оцінювання частотних, діелектричних та інших властивостей матеріалів.

На прикладі радарного методу були досліджені зразки двох матеріалів з повітряними бульбашками в структурі та без них за допомогою вимірювання питомого поглинання спектральної густини потужності електромагнітних шумових сигналів з діапазоном

37—52 ГГц, що пройшли через них, за кімнатної температури (рис. 3).

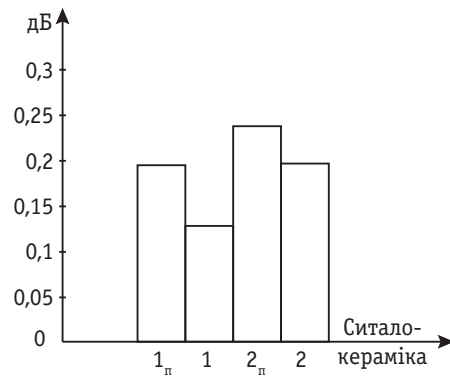


Рис. 3. Залежність питомого поглинання зразками матеріалу зондувального шумового сигналу (37—52 ГГц) за наявності повітряних бульбашок (1_п, 2_п) та без них (1, 2)

У зоні повітряних бульбашок (поз. 1п, 2п) поглинання матеріалу вище, ніж в однорідному матеріалі. Вимірювання показали, що рееструються бульбашки розміром порядку $\lambda/4$ (де λ — інтегральна довжина хвилі зондувального сигналу).

Отримана різниця підвищеного рівня питомого поглинання спектральної густини потужності в зоні контролю повітряних бульбашок порівняно з матеріалом, що має допустимі параметри, перевірялася також експериментально на зразках лабораторним методом. Результати експерименту підтвердили, що зі збільшенням розмірів повітряних бульбашок втрати потужності сигналу в матеріалі збільшуються, що збігається з проведеним математичним моделюванням (рис. 3).

Нижче наведено результати досліджень ряду матеріалів з використанням запропонованої методики та розробленої системи неруйнівного радарного контролю параметрів на зразках 1, 2 і 5 — ситали кристалізовані, зразки 3 і 4 — ситали некристалізовані, зразок 6 — ситало-кераміка [10]. Дослідження

радарним методом питомих поглинальних властивостей ситалів 1 і 2 у діапазоні 37 — 53 ГГц за температури 24 °С подано на рис. 4.

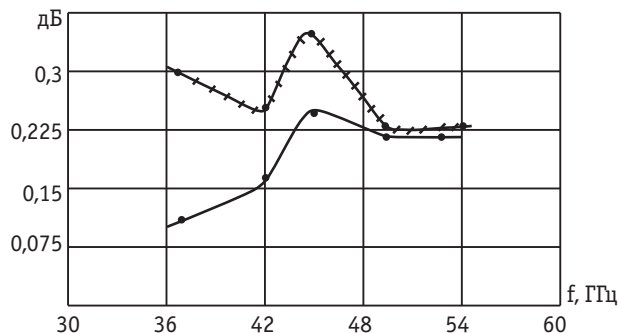


Рис. 4. Залежність питомих поглинальних властивостей ситалів у діапазоні 37 — 53 ГГц

Із графіка (рис. 4) видно, що ситали 1 і 2 мають максимальне питоме поглинання на частоті 45 ГГц. У цілому поглинальні властивості ситалів на цих частотах мають нелінійний характер, що необхідно враховувати під час оцінювання їх радіопрозорості.

Результати дослідження радарним методом питомого поглинання різними зразками ситалів шумового сигналу (37—52 ГГц) за температури 24 °С подано на рис. 5.

Із діаграми (рис. 5) видно, що найбільше питоме поглинання сигналу в ситалі 1, середнє — у ситалів 2 і 5, найменше — 3 і 4. Це вказує на те, що кристалізація ситалів збільшує їх поглинальні властивості.

Таким чином, розроблена еквівалентна схема та узагальнена математична модель обґрунтовують фізичні основи радарного неруйнівного контролю і методи перетворення сигналів вимірювальної інформації. Результати математичного моделювання та експериментальні перевірки процесів мікрохвильового неруйнівного радарного контролю підтвердили, що зміна властивостей матеріалів призводить до зміни рівня їх характеристичного хвильового опору. Це є основою для контролю властивостей діелектричних

матеріалів і, відповідно, дозволяє неруйнівним способом за допомогою вимірювання параметрів мікрохвильових сигналів реєструвати та контролювати властивості матеріалів.

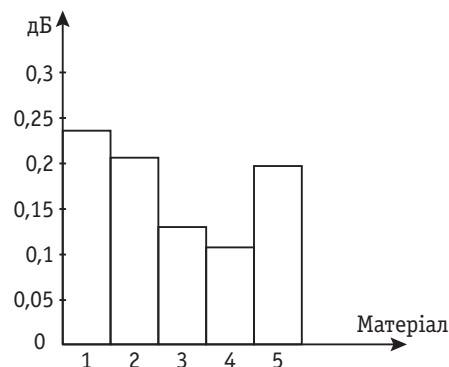


Рис. 5. Залежність питомого поглинання зразками ситалів шумового сигналу (37—52 ГГц)

Результати математичного моделювання і проведених радарним методом експериментальних досліджень корелюють з лабораторними дослідженнями, що підтверджується адекватністю розробленої моделі з результатами експериментальних вимірювань і сприяють підвищенню достовірності контролю.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена еквівалентна схема і математичне моделювання обґрунтовують фізичні основи радарного неруйнівного контролю і методи перетворення сигналів вимірювальної інформації.
2. Математичне моделювання та експериментальна перевірка процесів мікрохвильового неруйнівного радарного контролю підтвердили, що зміна властивостей матеріалів призводить до зміни рівня їх характеристичного хвильового опору.
3. Встановлено, що результати математичного моделювання та експериментальних досліджень корелюють між собою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Саватеев А. В. Шумовая термометрия / Саватеев А. В. — Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. — 132 с.
2. Головка Д. Б. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин / Головка Д. Б., Скрипник Ю. О., Яненко О. П. — К. : Либідь, 2003. — 328 с.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. / Под ред. академ. Девяткова Н. Д. [учебн. для студентов ВУЗов]. — М. : Высш. школа, 1970. — 440 с.
4. Мищенко С. В. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов / С. В. Мищенко, Н. А. Малков. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. — 127 с.
5. Головка Д. Б. Методи і засоби частотно-дисперсійного аналізу матеріалів та речовин / Головка Д. Б. — Київ : Либідь, 1999. — 214 с.
6. Куценко В. П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / [Куценко В. П., Скрипник Ю. А., Трегубов Н. Ф., Шевченко К. Л., Яненко А. Ф.]. — Донецьк : ІПШІ «Наука і освіта», 2011. — 324 с.
7. Головка Д. Б. Методи і засоби частотно-дисперсійного аналізу матеріалів та речовин / Головка Д. Б. — Київ : Либідь, 1999. — 214 с.
8. Головка Д. Б. Методи і засоби частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів: Фізичні основи / Д. Б. Головка, Ю. О. Скрипник. — К. : ФАДА, ЛТД, 2000. — 200 с.
9. Куценко В. П. Радиометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / [Куценко В. П., Скрипник Ю. О., Трегубов М. Ф., Шевченко К. Л., Яненко О. П.]. — Донецьк : ІПШІ «Наука і освіта», 2012. — 348 с. ■