

В.П. Куценко (докт. техн. наук, доц.)
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк
кафедра системного аналізу та моделювання
Державне науково-виробниче підприємство „Кварсит”, м. Костянтинівка
E-mail: donetsk50@mail.ru

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МІКРОХВИЛЬОВИХ ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ

Запропоновано математичне моделювання властивостей пористих діелектричних матеріалів при використанні мікрохвильових експертних систем у технологіях виробництва на прикладі еквівалентній схемі. Розраховано залежності спектральної щільності потужності шумів матеріалу від розмірів дефектів структури, від його температури при фіксованих розмірах дефекту, зміни хвильового опору від розмірів дефекту в його структурі. Проведені дослідження взаємозв'язку пористості матеріалу з спектральною щільністю потужності його власних радіотеплових випромінювань.

Ключові слова: моделювання, неруйнівний мікрохвильовий контроль, спектральна щільність потужності, дефекти структури.

Вступ

Радіометричні мікрохвильові методи і засоби застосовують в експертних системах для контролю якості і геометричних розмірів виробів з діелектричних матеріалів. Відомо, що досліджувані матеріали і вироби впливають на проходження, відбиття, поглинання і розсіювання як власних, так і зовнішніх радіохвиль. По ступеню зміни їхніх параметрів можна судити про характерні властивості самого матеріалу, а також про відхилення їх від номіналу [1-5].

В останні десятиріччя активно розвиваються радіометричні системи і методи дослідження фізичних і біологічних об'єктів. Так роботи ведуться в Мерілендському університеті США, в Єрусалимському університеті Ізраїлю, Сеульському національному університеті Кореї і ряді інших наукових центрів розвинутих країн, в т.ч. Росії та України, результатом яких стало виникнення нового напрямку радіометричного контролю, що базується на використанні принципів ближньопольової діагностики параметрів об'єктів, включаючи вимірювання електрофізичних параметрів матеріалів.

Постановка задачі дослідження

Для подальшого розвитку мікрохвильових експертних систем діелектричних матеріалів і виробів, актуальною є проблема створення загальної теорії НВЧ ближньопольової діагностики, яка включає розвиток та узагальнення математичних моделей мікрохвильових процесів у технологіях радіометричного контролю.

Основна частина

Порушення структури і властивостей діелектричних матеріалів виробів майже завжди супроводжується зміною їх фізико-механічних параметрів, а, отже, і результатів взаємодії електромагнітних хвиль із ними [1], [2], [6-8]. При мікрохвильовому контролі даних матеріалів важливе значення мають діелектрична постійна ϵ і тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$.

Для подальшої оцінки можливості використання даних методів радіометричного контролю параметрів діелектричних матеріалів і виробів на їх основі було проведено

математичне моделювання процесів їх неруйнівного мікрохвильового контролю у технологіях виробництва на прикладі пористих діелектричних матеріалів.

З урахуванням того, що одними з основних дефектів структури продукції, що впливають на її міцність і радіотехнічні характеристики, є повітряні пузири і відхилення від норми пористості матеріалу, моделювання було проведено на початку на прикладі наявності в структурі матеріалу дефекту у вигляді повітряного пузиря. Для чого була побудована модель структури виробу із зазначенням електромагнітних параметрів як самого матеріалу, так і дефектного включення, а також розмірів дефекту, відстаней його розташування відносно стінок виробу (рис. 1).

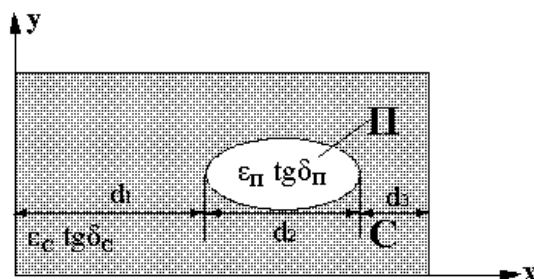


Рисунок 1 – Модель структури виробу при наявності повітряних пузирів

Розв'язання поставленої задачі проведено методом еквівалентних схем [9], який з погляду поширення енергії представлений як послідовно паралельне з'єднання RLC кіл, що відображають процес формування і проходження електромагнітної енергії (власної радіотеплової і зовнішньої зондувальної), яка несе інформацію про властивості виробів із пористих діелектричних матеріалів у зоні неруйнівного мікрохвильового контролю (рис. 2).

Математичне моделювання процесу радіотеплового контролю дефектів в виробах з пористого діелектричного матеріалу проведемо на прикладі повітряних пузирів і розшарувань (при цьому можна множини дрібних повітряних бульбашок у структурі матеріалу, розглядати також як одиничний пузир з їх інтегральним об'ємом) з використанням еквівалентної схеми рис. 2.

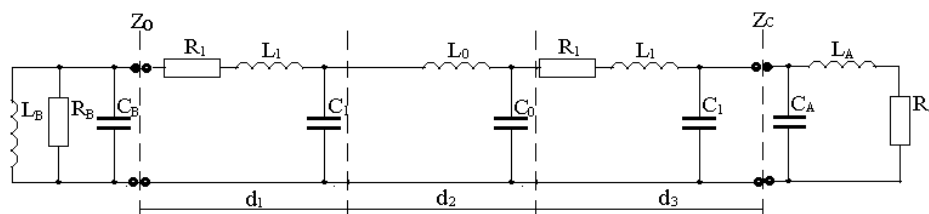


Рисунок 2 – Еквівалентна схема для моделювання процесу контролю дефектів структури пористих діелектричних матеріалів і виробів на їх основі у технологіях виробництва радіотепловим методом

На рис. 2 позначено R , L і C відповідно активні втрати, індуктивні і ємнісні властивості середовища, індекси позначають належність: 1 – до діелектричних матеріалів із властивостями, що відповідають нормі, 0 – до повітряних пузирів і розшарувань, В – до навколишнього середовища, А – до приймальної антени, Z_0 , Z_C – характеристичний хвильовий опір відповідно навколишнього середовища і діелектричного матеріалу.

Для математичного моделювання процесу радіотеплового контролю дефектів структури на прикладі повітряних пузирів в виробах з пористих діелектричних матеріалів зазначимо, що товщина виробу d складається з ділянок d_1 , d_2 і d_3 , де d_1 і d_3 – ділянки товщини

виробу в зоні контролю з властивостями матеріалу, що відповідає нормі, а d_2 – товщина дефектної ділянки. Параметри зовнішнього середовища дорівнюють параметрам повітряних пузирів і розшарувань: $R_B=Z_0$, $L_B=L_0$ і $C_B=C_0$.

Моделювання проведено у відповідності з теорією визначення параметрів неоднорідностей методом еквівалентних схем при впливі випадкових НВЧ-сигналів на лінійні стаціонарні коло, згідно з якою ці коло (матеріал з дефектом) зручно характеризувати речовим коефіцієнтом передачі, що визначається хвильовим опором матеріалу. Тому, враховуючи послідовно паралельне з'єднання RLC-кіл представленої еквівалентної схеми, що була на початку складена функція для характеристичного хвильового опору Z_C пористого діелектричного матеріалу виробу в зоні контролю (1), як функція від електричних параметрів схеми, розмірів дефекту (пузиря) і відстаней його розташування в структурі виробу, а також частоти радіометричного контролю, яка набуде вигляду:

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

де Z_0 , R_1 , L_0 , L_1 , C_0 , C_1 , d_2 і d_1 , d_3 , – відповідно активні хвильові опори, індуктивності і ємності, товщина виробу в зоні контролю дефектної ділянки і товщини, де властивості матеріалу відповідають нормі; ω – частота, на якій здійснюється радіометричний неруйнівний контроль.

Зв'язок між електричними параметрами пористих діелектричних матеріалів виробу в зоні контролю із параметрами еквівалентної схеми, описується виразами, отриманими з типових формул [8-10]:

$$R_1 = \frac{1}{\omega C_1 \operatorname{tg} \delta}, \quad L_1 = \frac{1}{C_0 \varepsilon \omega}, \quad Z_0 = \frac{1}{C_0 \omega} = \omega L_0, \quad C_1 = C_0 \varepsilon, \quad L_0 = \frac{Z_0}{\omega}, \quad C_0 = \frac{1}{\omega Z_0}. \quad (2)$$

Окрім того позначимо відстані d_1 і d_3 до повітряного пузиря через товщину матеріалу d і розмір пузиря d_2 як функцію координати X (див. рис. 1):

$$d_1 = (d - d_2)X, \quad d_3 = (d - d_2)(1 - X). \quad (3)$$

Замінімо у формулі (1) параметри еквівалентної схеми електричними параметрами матеріалів виробу в зоні контролю (2), після перетворення одержимо вираз характеристичного хвильового опору Z_C матеріалу виробу:

$$Z_C(Z_0, \operatorname{tg} \delta, \varepsilon, d, d_2, X, \omega) = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{Z_0 + \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega C_0} + d_1 \frac{Z_0}{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta + j d_1 \frac{Z_0}{\varepsilon} + j\omega d_1 \frac{\varepsilon}{Z_0} + j d_2 Z_0} + j \frac{d_2}{Z_0} + \frac{Z_0}{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta d_3 + j \frac{Z_0}{\varepsilon} d_3} + j \frac{\varepsilon}{Z_0} d_3}}, \quad (4)$$

Далі знаходимо реальну частину функції характеристичного хвильового опору Z_C матеріалу виробу

$$Z_{CP}(Z_0, \operatorname{tg} \delta, \varepsilon, d, d_2, X, \omega) = \operatorname{Re} Z_C(Z_0, \operatorname{tg} \delta, \varepsilon, d, d_2, X, \omega), \quad (5)$$

яка буде використана для розрахунку функції спектральної щільності потужності (дисперсії) власних електромагнітних шумів матеріалу виробу за формулою Найквіста:

$$\bar{U}_{CP}^2(Z_0, \operatorname{tg} \delta, \varepsilon, d, d_2, X, T, \omega) = 4kTZ_{CP}(Z_0, \operatorname{tg} \delta, \varepsilon, d, d_2, X, \omega). \quad (6)$$

Залежність спектральної щільності потужності шумів пористого діелектричного матеріалу з врахуванням повітряного пузиря в його структурі (рис. 3) буде розрахована з використанням програми Mathcad 15 як різниця між функціями, побудованими на основі (6), в одному випадку з параметрами матеріалу виробу, що відповідає нормі, і в другому випадку при наявності в структурі повітряного пузиря:

$$\bar{U}_{\Delta CP}^2(Z_0, \text{tg}\delta, \varepsilon, d, d_2, X, T, \omega) = [\bar{U}_{CP}^2(Z_0, \text{tg}\delta, \varepsilon, d, 0, X, T, \omega) - \bar{U}_{CP}^2(Z_0, \text{tg}\delta, \varepsilon, d, d_2, X, T, \omega)] \quad (7)$$

де T – температура матеріалу виробу, що прийнята для розрахунків 310К, $\varepsilon=3,37$, $\text{tg}\delta=0,001$, $\omega=50$ ГГц.



Рисунок 3 – Залежність спектральної щільності потужності шумів пористого діелектричного матеріалу з врахуванням розмірів повітряного пузиря в його структурі

Моделювання дозволило встановити, що рівень спектральної щільності потужності шумів від матеріалу виробу зменшується при збільшенні розмірів повітряного пузиря, а порівнювана за формулою (7) різниця дисперсій, що відповідає методу радіометричного контролю з періодичним порівнянням сигналів, збільшується і складає близько 10^{-19} Вт/Гц (графік рис. 3 а), при цьому дисперсія зовсім не залежить від місця розташування пузиря (вісь X) в матеріалі виробу (рис. 3 б).

Крім того, комп'ютерне моделювання дало можливість розрахувати вплив зміни температури матеріалу виробу на достовірність контролю. Дослідження проводилося для оцінки впливу зміни температури матеріалу виробу в діапазоні 300....340К на рівень спектральної щільності потужності шумів від повітряного пузиря розміром $d_2=2$ мм (рис. 4).

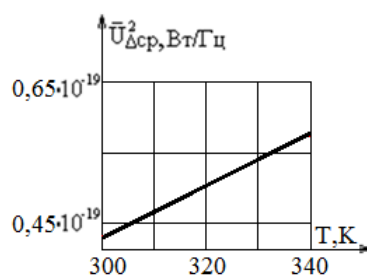


Рисунок 4 – Залежність спектральної щільності потужності шумів пористого діелектричного матеріалу від його температури при розмірах повітряного пузиря 2 мм

Розрахунки показують, що зміна температури виробу на 40К призводить до зміни спектральної щільності потужності електромагнітного шуму на $0,1 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц і може дати відносну похибку вимірювань порядку 16%, а при зміні температури на 4-5К – порядку 1,5%. Тобто з урахуванням наявних допусків для отримання достовірного контролю розмірів пузиря достатньо забезпечити термостабілізацію у зазначених межах.

Також була розрахована залежність зміни реальних частин хвильових опорів матеріалу від розмірів повітряного пузиря в структурі, при нормі і з пузирьом (рис. 5), яка характеризує втрати енергії сигналу при проходженні через матеріал з дефектом.

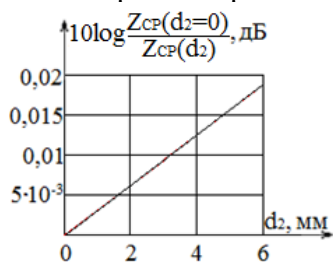


Рисунок 5 – Залежність змін хвильового опору пористого діелектричного матеріалу від розмірів повітряного пузиря в його структурі

Проведене моделювання показує, що для впевненої і достовірної реєстрації повітряних пузирів і розшарувань необхідна радіометрична апаратура з флуктуаційним порогом чутливості не менше 10^{-20} - 10^{-22} Вт/Гц.

Враховуючи, що спектральна щільність потужності сигналу, випромінюваного матеріалом виробу не залежить від місця розташування в ньому дефекту у вигляді повітряного пузиря, була запропонована гіпотеза, яка полягає в тому що пористість матеріалу (рис. 6) (як найважливіший параметр виробу, значення якого і стабільність якого потрібно контролювати по всьому об'єму виробу), можна уявити як множину дрібних повітряних бульбашок в структурі матеріалу і розглядати її як одиничний пузир з їх інтегральним об'ємом.

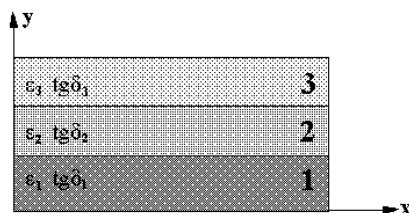


Рисунок 6 – Модель структури виробу при порушенні пористості матеріалу

Для перевірки цієї гіпотези були виготовлені 5-ть зразків одного хімічного складу і однакового розміру, з однаковою чистотою обробки поверхні, але з різною пористістю, яка була проконтрольована існуючим в технології методом, що полягає в тому, що зразки зважували на аналітичних вагах, потім після вакуумного відсмоктування з них повітря поміщалися в дистильовану воду при кімнатній температурі. Після добового просочення їх знову зважували і за різницею ваги за відповідними таблицями визначали пористість. Дані отримані існуючим методом технологічного контролю наведені в таблиці 1 в 2 і 3 стовпцях. Після цього зразки були висушені у сушильному шафі і піддані радіотепловому контролю.

Таблиця 1

Результати досліджень пористості і спектральної щільності потужності радіотеплових випромінювань діелектричного матеріалу лабораторним і радіотепловим методами

№ зразка	Водопоглинення, %	Пористість, %	$\bar{U}_{\text{дср}}^2 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц
1	0,035	0,09	1,68
2	0,033	0,08	1,73
3	0,022	0,06	1,89
4	0,02	0,05	1,91
5	0,018	0,04	1,98

Вимірювання спектральної щільності потужності радіотеплових шумів проводилися по широкій стінці зразків для кожного з них по 10 разів при температурі нагріву в термостаті до 38°C (310K). Час вимірювання одного зразка складав 20-30 сек. Отримані результати статистично оброблені і зведені в таблицю 1 (останній стовпець) і рис. 7.

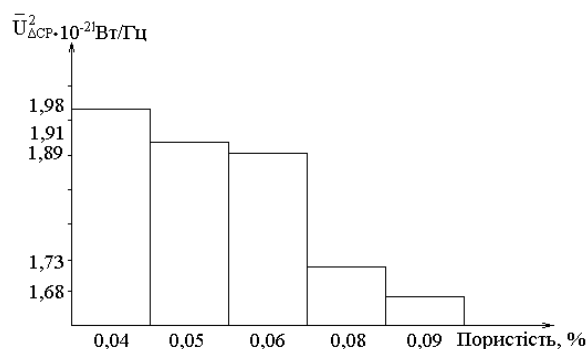


Рисунок 7 – Залежність спектральної щільності потужності власних радіотеплових випромінювань діелектричного матеріалу від його пористості

Проведені дослідження взаємозв'язку пористості діелектричного матеріалу з спектральною щільністю потужності його власних радіотеплових випромінювань на 5 експериментальних зразках показали пряму кореляцію результатів.

Встановлено, що чим менше пористість матеріалу, тим більше спектральна щільність потужності власних радіотеплових шумів матеріалу (таблиця 1, рис. 7). При цьому точність вимірювань параметрів пористості радіотепловим методом забезпечила навіть завищені вимоги, закладені в зразках.

Висновки

1. Знайшли подальший розвиток наукові основи мікрохвильового радіометричного неруйнівного контролю властивостей діелектричних матеріалів і виробів за рахунок вимірювання параметрів низькоінтенсивних шумових НВЧ-сигналів методами періодичного порівняння, потужність яких зіставляювана і навіть нижче рівня паразитних шумів вхідних елементів радіометричних приладів.

2. Встановлено, що параметри дефектів структури матеріалів корелюють з потужністю спектральної щільності власного радіотеплового випромінювання матеріалу.

3. Показано, що достовірність методів мікрохвильового радіометричного неруйнівного контролю властивостей діелектричних матеріалів і виробів підтверджується адекватністю розроблених математичних моделей процесів контролю з результатами практичних досліджень.

Список використаної літератури

1. Головка Д.Б. Методи і засоби частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів: Фізичні основи / Д.Б. Головка, Ю.О. Скрипник. – К.: ФАДА, ЛГД, 2000. – 200 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. Куценко В.П., Яненко О.П. Радіометричний неруйнівний контроль діелектричних виробів // Вісник Національного технічного університету України „КПІ”. – Серія „Радіотехніка. Радіоапаратобудування”. – Вип. 41/2010. – Київ. НТУУ „КПІ”, 2010. – С.124–129.
4. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ, т. 1/ Под ред. академика Девяткова Н.Д. [учебн. для студентов ВУЗов]. – М.: Высш. школа, 1970. – 440 с.
5. Мищенко С.В. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов / С.В. Мищенко, Н.А. Малков. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 127 с.

6. Головка Д.Б. Методи і засоби частотно-дисперсійного аналізу матеріалів та речовин / Головка Д.Б. – Київ: Либідь, 1999. – 214 с.
7. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / [Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф.]. – Донецьк: ІПШ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.
8. Куценко В.П. Радиометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / [Куценко В.П., Скрипник Ю.О., Трегубов М.Ф., Шевченко К.Л., Яненко О.П.]. – Донецьк : ІПШ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.
9. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Левин Б.Р. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

References

1. Golovko, D.B. and Skripnik, Yr.A. (2000), *Metody i zasoby chastotno-dispersiynogo analizy rechovin ta materialiv: Fizichni osnovy* [Methods and facilities of frequency-dispersible analysis of substances and materials : Physical bases], FADA LTD, Kyiv, Ukraine.
2. Golovko, D.B., Skripnik, Yr.A. and Yanenko, A.F. (2003), *Nadvusokochastotni metody ta zasoby vymirjvannj fizychnych velychin* [Super-high-frequency methods and facilities of measuring of physical sizes], Lybid, Kyiv, Ukraine.
3. Kutsenko, W.P. and Yanenko, A.F., (2010) “Aerophare non-destructive control of dielectric wares” *Radiometrychniy neryjnivnij kontrol dielektrychnych vyrobiv*, Announcer of the National technical university of Ukraine “KPI”. are Series of “Radiotrician. Apparatus Radiobuilding”, vol. 41, pp. 124-129.
4. Lebedev I.V., (1970), *Technika i pribory SVCh* [Technique and devices OHF], vol. 1, in Devytkov, N.D. (ed), [textbook for the students of Institutions of higher learning], Higher school, Moscow, USSR.
5. Michenko S.V. and Malkov, N.A., (2003), *Proektirovanie radiovolnovykh (SVCh) priborov nerazryshajshchego kontrolj materialov* [Planning of radio wave (OHF) devices of-not destroying control of materials], House of the Tambov state technical university, Tambov, Russia.
6. Golovko D.B., (1999), *Metody i zasoby chastotno-dispersiynogo analizy materialiv ta rechovin* [Methods and facilities of frequency-dispersible analysis of materials and substances], Kyiv, Ukraine.
7. Kutsenko, W.P., Skripnik, Yr.A., Tregubov, N.F., Shevchenko, K.L. and Yanenko, A.F. (2011), *Metodu i sredstva sverchvusokochastotnoi radiometrii* [Methods and facilities of super-high-frequency radiometry], IPAI «Science and education», Donetsk, Ukraine.
8. Kutsenko, W.P., Skripnik, Yr.A., Tregubov, N.F., Shevchenko, K.L. and Yanenko, A.F. (2012), *Radiometrychnij SVCh-kontrol vlastuvostei materialiv* [Aerophare OHF-control of properties of materials], IPAI «Science and education», Donetsk, Ukraine.
9. Levin, B.R., (1989), *Teoretycheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* Theoretical bases of the statistical radioengineering, 3rd. ed, Radio and connection, Moscow, USSR.

Надійшла до редакції:
08.05.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

В.П. Куценко

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Математическое моделирование свойств диэлектрических материалов при использовании микроволновых экспертных систем. Предложено математическое моделирование свойств пористых диэлектрических материалов при использовании микроволновых экспертных систем в технологиях производства на примере эквивалентной схемы. Рассчитаны зависимости спектральной плотности мощности шумов материала от размеров дефектов структуры, от его

температуры при фиксированных размерах дефекта, изменения волнового сопротивления от размеров дефекта в его структуре. Проведенные исследования взаимосвязи пористости материала со спектральной плотностью мощности его собственных радиотепловых излучений..

Ключевые слова: моделирование, неразрушающий микроволновой контроль, спектральная плотность мощности, дефекты структуры.

V.P. Kutsenko

Donetsk National Technical University

Mathematical design of properties of dielectric materials at the use of microwave consulting models. The mathematical design of processes of non-destructive microwave control of porous dielectric materials offers in technologies of production on the example of equivalent chart at influence casual signals on linear stationary chains. In obedience to the theory of determination of parameters of heterogeneities by the method of equivalent charts these chains (material with a defect) it comfortably to characterize a material transmittivity that is determined by the impedance of material. A design allowed to set that the level of spectral closeness of power of noises from material of good diminishes at the jumboizing of air bubble, and the compared difference of dispersions, that corresponds to the method of aerophare control with periodic comparison of signals, increases and makes near 10^{-19} Wt/Hertz, here dispersion quite not depends on the place of location of bubble in material of good. Dependences of spectral closeness of power of noises of material are expected on the sizes of defects of structure, from his temperature at the fixed sizes of defect, changes of impedance from the sizes of defect in his structure. A computer design gave an opportunity to count influence of change of temperature of material of good on authenticity of control. Research was conducted for the estimation of influence of change of temperature of material of good in the range of 300....340K on the level of spectral closeness of power of noises from an air bubble measuring 2мм. Studies of intercommunication of porosity of dielectric material are undertaken with the spectral closeness of power of his own radiothermal radiations on experimental standards showed direct correlation of results. It is set that than less porosity of material, the anymore spectral closeness of power of own radiothermal noises of material. Scientific bases of microwave aerophare non-destructive control of properties of dielectric materials and wares found further development on their basis due to measuring of parameters low intensive noise signals by the methods of periodic comparison, power of what comparable and even below level of parasite noises of entrance elements of aerophare devices. It is set that the parameters of defects of structure of materials correlate with power of spectral closeness of own radiothermal radiation of material. It is shown that methods of microwave aerophare non-destructive control of properties of dielectric materials and wares validified by adequacy of the worked out mathematical models of control processes with the results of practical researches.

Keywords: design, non-destructive microwave control, spectral closeness of power, defects of structure.



Куценко Владимир Петрович, Украина, закончил Таганрогский радиотехнический институт, Заслуженный работник промышленности Украины, докт. техн. наук, с.н.с., доцент кафедры системного анализа и моделирования ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина), с.н.с.-консультант Государственного научно-производственного предприятия «Кварсит» (ул. Шмидта, 20, г. Константиновка, Донецкой обл., 85104, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.