УДК 621.315.61

**Б. О. Дем'янчук, д.т.н., Ж. О. Хижняк**

*Військова академія, м. Одеса*

# МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВУ В КУСОЧНО-ОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

*Запропоновано методику експериментально-розрахункової оцінки очікуваної величини коефіцієнта перетворення електромагнітної енергії мікрохвильового діапазону від синтезованого кусочно-однорідного середовища композитного феритового матеріалу на металевій підложці з урахуванням коефіцієнтів відбиття та проходження шарів середовища, які попередньо експериментально виміряні. Методика дозволяє проектувати покриття з потрібними властивостями та визначати потрібну кількість шарів для досягнення необхідного результату.*

***Ключові слова:*** *коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії, багатошарове кусочно-однорідне середовище, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт проходження шарів середовища.*

Фізико-математичні та технологічні труднощі виготовлення матеріалів для екранування апаратури [1], для радіозахисту об'єктів [2], матеріалів для узгодження навантажень у хвилеводах [3], чи то покрить для поглинання баластної енергії у мікрохвильових печах [4-7] добре відомі.

В статті [8] теоретично обґрунтовані умови узгодження хвильових опорів на межі розділу повітря-покриття (одношарове). Реалізація цих умов є більш складна, ніж умов узгодження хвильових опорів повітря і багатошарового покриття. Однак, на теперішній час відсутні рекомендації, які спрямовані на рішення задач оцінки інтегральних параметрів багатошарового кусочно-однорідного середовища за значеннями параметрів шарів цього середовища. Через труднощі в розрахунках відсутні методи визначення потрібної кількості шарів середовища за заданим значенням його коефіцієнта перетворення, у випадку якщо параметри шарів відомі. Тому, вирішення наукового завдання експериментально-розрахованої оцінки рівня перетворення електромагнітної енергії в такому середовищі є актуальним. Без цих попередніх розрахунків практична реалізація феромагнітних багатошарових середовищ-перетворювачів енергії поля в теплову з градієнтом коефіцієнта проходження коливань мікрохвильового діапазону також супроводжується технологічними труднощами, які характеризуються трудомісткістю та незадовільною передбачуваністю властивостей виготовлених зразків матеріалів [5]. Це особливо проявляється у випадку виготовлення кусочно-однорідних покриттів, які нанесені на металеву підложку та призначені для перетворення електромагнітної енергії в теплову в мікрохвильових пристроях нового типу [4]. Величина коефіцієнта перетворення в цьому випадку залежить, як відомо, від багатьох факторів: коефіцієнтів відбиття та коефіцієнтів проходження кожного шару, кількості шарів, градієнта електромагнітних втрат покриття від шару до шару та від електропровідності металевої підложки з окисовим шаром випадкової величини, а, отже, і його провідності.

Запропонована стаття спрямована на заповнення вказаної прогалини в рішенні цієї задачі шляхом визначення песимістичної оцінки коефіцієнту перетворення електромагнітної енергії.

Метою статті є дослідження кількісної залежності загального коефіцієнта перетворення покриття від кількості шарів і відбиваючих властивостей металевої підложки та багатошарового середовища. Для досягнення цієї мети була одержана формула для цього коефіцієнта у випадку свавільної кількості шарів кусочно-однорідного середовища з електромагнітними втратами.

Запропонована методика передбачає: виготовлення зразків кожного з шарів; експериментальне визначення коефіцієнтів проходження і коефіцієнтів відбиття кожного з цих шарів за допомогою відповідних панорамних вимірювачів, наприклад, типу Р2-56, Р2-61, Р2-67; розрахунок значення коефіцієнта перетворення електромагнітної енергії в теплову за формулами, які приведені нижче; порівняння отриманого результату з заданим; корекцію кількості шарів з нарощуванням втрат від шару до шару, їх товщини або градієнта електромагнітних втрат в шарах, якщо кінцевий результат не збігається з заданим.

Задача розрахунку значень коефіцієнта відбиття та проходження при наявності експериментальних даних щодо параметрів кожного з шарів вирішується з урахуванням обмежень, наведених нижче, які відображують специфіку покриття того типу, що розглядається.

У зв'язку з малими розбіжностями у величинах коефіцієнтів відбиття сусідніх шарів, а також у зв'язку із малими значеннями коефіцієнтів відбиття верхніх шарів та малих значень коефіцієнтів проходження нижніх шарів, доцільно вважати:

- в *n*-шаровому кусочно-однорідному середовищі має місце лише двонаправлене розповсюдження електромагнітного поля, а саме: прямі сигнали розповсюджуються лише донизу (повторювальних перетворень сигналів в шарах не виникає), а відбиті сигнали розповсюджуються лише догори (не перевідбиваються донизу);
- з сигналом, відбитим від металевої підложки M (рис. 1), складаються сигнали, відбиті від усіх шарів середовища, показник перетворення якого вимірюється;
- з метою спрощення експериментально-розрахункових співвідношень та у зв'язку з достатністю визначення найменшого значення коефіцієнта перетворення середовища, фазові розбіжності сигналів, які складаються, як прямих, так і перевідбитих від кожного шару, не враховуються.

З урахуванням вказаних припущень, згідно рисунку 1, визначимо максимальні (ті, які складаються за потужністю) значення сигналів: сигналу $A$, якій падає на металеву підложку; сигналу $B$, який є відбитим від металевої підложки та пройшов після цього усі n шарів; складового сигналу $C$, відбитого від усіх $n$ шарів (без урахування відбиттів від підложки).

Запропонуємо позначення:

$P_0$ – потужність сигналу, який падає на зовнішній шар;

$K_{Oi}$ – коефіцієнт відбиття сигналу (за потужністю) від і-го шару, $K_{O(i+1)} < K_{Oi}$; $\forall\ i = \overline{1,(n-1)}$;

$K_{\Pi i}$ – коефіцієнт проходження *i*-го шару, $K_{\Pi(i+1)} > K_{\Pi i}$, $\forall\ i = \overline{1,(n-1)}$;

$K_{OM}$ – коефіцієнт відбиття сигналу від металевої підложки.

Отже, потужність сигналу A, який падає на металеву підложку, дорівнює добутку потужності сигналу, який падає на зовнішній шар покриття, на добуток коефіцієнтів падіння на кожний з шарів та коефіцієнтів проходження усіх n шарів у вигляді

$$A = P_0 \prod_{i=1}^{n} (1 - K_{Oi}) K_{\Pi i}. \qquad (1)$$

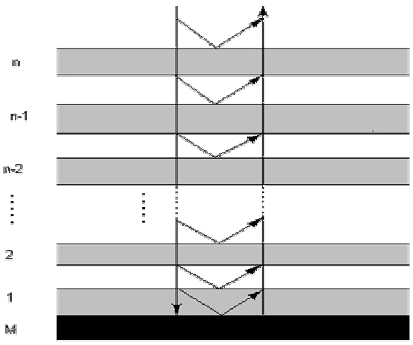


Рисунок 1 – Модель розповсюдження сигналів у кусочно-однорідному середовищі з градієнтом втрат на металевій підложці у прямому та оберненому напрямках

При розрахунку сигналу $B$, що є відбитим від металевої підложки, який пройшов після цього усі $n$ шарів, не враховується сигнал, відбитий від нижнього кордону першого шару, співпадаючого з верхнім кордоном металевої підложки, але ураховується коефіцієнт відбиття $K_{O(n+1)}$ від верхнього кордону $n$-го шару, фактично, від шару повітря на межі покриття. Згідно (1), сигнал $B$ дорівнює

$$B = P_0 \cdot \prod_{i=2}^{n-1} (1 - K_{Oi})^2 K_{\Pi i}^2 K_{OM} (1 - K_{O1}) \times \times K_{\Pi 1}^2 (1 - K_{O(n-1)}). \qquad (2)$$

При визначенні сумарного сигналу $C$, відбитого від усіх $n$ шарів, необхідно урахувати те, що сигнал, відбитий від верхнього шару, який є найбільшою складовою величини $C$, складається за сумою добутків сигналів, які падають на кожний подальший шар з урахуванням коефіцієнтів проходження і відбиття шарів без урахування коефіцієнта проходження шару, який лежить на межі металевої підложки. Сигнал $C$ має вигляд:

$$C = P_0 (1 - K_{O(n+1)}) \cdot \sum_{j=1}^{n-1} K_{Oj} K_{\Pi(j-1)}^2 (1 - K_{O(j+1)}) \times \times \prod_{i=j+2}^{n} (1 - K_{Oi})^2 K_{\Pi i}^2. \qquad (3)$$

Згідно з (2), (3) коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії $\gamma$ у кусочно-однорідному середовищі з градієнтом втрат (на металевій підложці), визначимо у вигляді відносної різниці, яка дорівнює:

$$\gamma = \frac{P_0 - (B + C)}{P_0}. \qquad (4)$$

В результаті, згідно до (2) – (4) отримуємо песимістичну оцінку коефіцієнта перетворення електромагнітної енергії в теплову у кусочно-

однорідному середовищі (на металевій підложці) в залежності від параметрів шарів у вигляді:

$$\gamma = 1 - K_{П1}^2 K_{ОМ}\left(1 - K_{О1}\right)\left(1 - K_{О(n+1)}\right)\prod_{i=2}^{n-1}\left(1 - K_{Оi}\right)^2 K_{Пi}^2 + \\ + P_0\left(1 - K_{О(n+1)}\right)\sum_{j=1}^{n-1} K_{Oj} K_{П(j-1)}^2\left(1 - K_{О(j+1)}\right)\times \\ \times \prod_{i=j+2}^{n}\left(1 - K_{Оi}\right)^2 K_{Пi}^2 + K_{Оn}. \quad (5)$$

Звичайно, застосування цієї залежності з метою прогнозування очікуваного коефіцієнта перетворення $\gamma$ є доцільним лише за наявності експериментально виміряних (попередньо) параметрів зразків кожного шару $K_{Оi}$ та $K_{Пi}$; $i = \overline{1,n}$, а саме: значень коефіцієнтів відбиття та проходження шарів на заданій частоті або в заданому діапазоні частот.

Залежність (5) може бути корисною і при вирішенні зворотної задачі: визначенні необхідної кількості шарів *n*, які б гарантували досягнення заданого, наприклад, мінімально припустимого коефіцієнту перетворення електромагнітної енергії в заданому діапазоні частот.

У випадку, коли виміряні експериментально коефіцієнти у складі (5) є функціями частоти, для розрахунку вказаного коефіцієнта перетворення $\gamma$, необхідно обрати значення параметрів шарів за критерієм:

$$K_{Оi} = \max K_{Оi}(f), \\ K_{Пi} = \max K_{Пi}(f), \forall i = \overline{1,n}. \quad (6)$$

Для прикладу розрахуємо значення коефіцієнта перетворення у *n*-шаровому (при $n = \overline{1,10}$) покритті з реальними параметрами, які отримані для зразків, що досліджуються, на основі зв'язуючого матеріалу у вигляді термоеластопласту типу ДСТ-30, який був наповнений дисперсною феритовою складною окисною сполукою зворотнього типу $NiCo_2O_4$ з напівпровідниковим рівнем питомої електропровідності. Параметри шарів $K_{Оi}$ та $K_{Пi}$ ($i = 1...10$), попередньо експериментально виміряні, наведено в табл. 1.

Практичні розрахунки здійснимо, вважаючи, що $K_{О(n+1)} \approx K_{Оn}$, а в якості металевої підложки використовується або алюміній, або нержавіюча сталь, коли коефіцієнт відбиття електромагнітних коливань від нержавіючої сталі приблизно у 1,5 рази менший, ніж від алюмінієвої підложки.

Таблиця 1 – Параметри шарів

| $K_{О1}$ | $K_{О2}$ | $K_{О3}$ | $K_{О4}$ | $K_{О5}$ | $K_{О6}$ | $K_{О7}$ | $K_{О8}$ | $K_{О9}$ | $K_{О10}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,55 | 0,50 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,02 | 0,01 |
| $1-K_{О1}$ | $1-K_{О2}$ | $1-K_{О3}$ | $1-K_{О4}$ | $1-K_{О5}$ | $1-K_{О6}$ | $1-K_{О7}$ | $1-K_{О8}$ | $1-K_{О9}$ | $1-K_{О10}$ |
| 0,45 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 0,98 | 0,99 |
| $K_{П1}$ | $K_{П2}$ | $K_{П3}$ | $K_{П4}$ | $K_{П5}$ | $K_{П6}$ | $K_{П7}$ | $K_{П8}$ | $K_{П9}$ | $K_{П10}$ |
| 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,65 | 0,70 | 0,75 |
| $K_{П1}^2$ | $K_{П2}^2$ | $K_{П3}^2$ | $K_{П4}^2$ | $K_{П5}^2$ | $K_{П6}^2$ | $K_{П7}^2$ | $K_{П8}^2$ | $K_{П9}^2$ | $K_{П10}^2$ |
| 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,42 | 0,49 | 0,56 |

Згідно даних таблиці 1, а також (5), (6), в результаті отримуємо різні рівні коефіцієнтів перетворення як функції кількості *n* шарів покриття;

для алюмінієвої підложки: $\gamma(1) = 0{,}163$; $\gamma(2) = 0{,}235$; $\gamma(3) = 0{,}370$; $\gamma(4) = 0{,}505$; $\gamma(5) = 0{,}639$; $\gamma(6) = 0{,}706$; $\gamma(7) = 0{,}772$; $\gamma(8) = 0{,}817$; $\gamma(9) = 0{,}858$; $\gamma(10) = 0{,}885$.

для сталевої підложки: $\gamma(1) = 0{,}448$; $\gamma(2) = 0{,}493$; $\gamma(3) = 0{,}581$; $\gamma(4) = 0{,}670$; $\gamma(5) = 0{,}759$; $\gamma(6) = 0{,}804$; $\gamma(7) = 0{,}848$; $\gamma(8) = 0{,}878$; $\gamma(9) = 0{,}905$; $\gamma(10) = 0{,}923$.

Отримані залежності $\gamma(n)$ мають ілюстративне призначення, але вони чітко вказують на однозначну залежність загального рівня відбиття покриття від кількості його шарів та вказують на залежність від типу металевої підложки. Але ця залежність послаблюється зі збільшенням кількості шарів.

**Висновки**

1. Значення коефіцієнта перетворення електромагнітної енергії суттєво залежить від кількості шарів композитного середовища. При цьому, з метою одержання загального коефіцієнта перетворення на рівні декількох відсотків, у реальних умовах потрібно десять і більше шарів.

2. Залежність коефіцієнта перетворення від параметрів першого шару, тобто від його відбиття, є найбільш суттєвою. Тому слід враховувати, що зв'язуюча основа композита повинна бути радіопрозорою з метою збільшення

результуючого коефіцієнта проходження хвилі у середовище. Досвід показує, що, наприклад, термоеластопластова зв'язуюча основа значно більш радіопрозора, ніж епоксидна чи керамічна.

3. Розглянута методика (на відміну від методики на основі метода спроб і помилок) забезпечує можливість оперативно прогнозувати очікуваний песимістичний результуючий коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в теплову в багатошаровому композиті по параметрам його шарів, а також визначати максимальну кількість шарів, яка необхідна для одержання припустимого результуючого перетворення, коли параметри шарів відомі.

4. Практично реалізувати експериментально-розрахункову методику за умови застосування багатошарового покриття більш доцільно при використанні комп'ютерної програми.

**Список використаних джерел**

1. Суржко А. И. Защити свой сервер / А. И. Суржко // Служба безопасности. – 1999. – № 11 – 12. – С. 17.

2. ОСТ 4ГО.054.102 «Поглотители высокочастотной энергии».

3. Саусворт Дж. К. Принципы и применения волноводной передачи. / Дж. К. Саусворт // Пер. с англ. Под ред. Сушкевича В.И. М.: Сов. радио, 1955. – 700 с.

4. Демьянчук Б.А. Принципы и применения микроволнового нагрева. / Б.А. Демьянчук – Одесса: Черноморье. 2004. – 520 с.

5. Демьянчук Б. А. Микроволновый нагрев. Новая технология. Теория и практика / Б. А. Дем'янчук. – Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing. – 2011. – 160 с.

6. Мицмахер М. Ю., Торгованов В. А. Безэховые камеры СВЧ. / М.Ю. Мицмахер, В.А. Торгованов – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.

7. Машуня Е. П. Электропроводность термопластических композиций, содержащих дисперсный токопроводящий наполнитель / Е. П. Машуня и др. // Композиционные полимерные материалы. – 1989. – № 43. – С. 24-38.

8. Демьянчук Б. А. Основы технологии согласования волновых сопротивлений на границе раздела воздуха и ферромагнитной среды / Б. А. Демьянчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 5. – С. 19 – 22.

*Надійшла до редакції 17.01.2013*

**Рецензент:** д.т.н., професор Скачков В. В., Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса.

**Б. А. Демьянчук,** д.т.н., **Ж. А. Хижняк**

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ В КУСОЧНО-ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

*Предложена методика экспериментально-расчетной оценки ожидаемой величины коэффициента преобразования электромагнитной энергии микроволнового диапазона от синтезированной кусочно-однородной среды композитного ферритового материала на металлической подложке с учетом коэффициентов отражения и прохождения слоев среды, которые предварительно экспериментально измеряют. Методика позволяет проектировать покрытие с нужными свойствами и определять нужное количество слоев для достижения необходимого результата.*

***Ключевые слова:*** *коэффициент превращения электромагнитной энергии, многослойная кусочно-однородная среда, коэффициент отражения, коэффициент прохождения слоев среды.*

**B. A. Demyanchuk**, DSc, **Z. O. Khyzhniak**

**ESTIMATION PROCEDURE OF ELECTROMAGNETIC ENERGY TRANSFORMATION FACTOR IN THE MULTILAYERED COVERING**

*The suggested method provides experimental – calculating definition of pessimistic estimation of the expected size of electromagnetic energy reflection factor of microwave range from the synthesized piecewise-homogeneous environment - covering of composite material on the metal substrate on factors values of reflection and factors of covering layers passage preliminary measured experimentally. This method allows to design coverage with necessary properties and determine the necessary amount of layers for achievement of necessary result.*

***Keywords:*** *coefficient of transformation of electromagnetic energy, multi-layered piece-homogeneous environment, reflectivity, coefficient of passing of layers of environment.*