

УДК 620.179.18

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ ВІДБИВАННЯ РАДІОХВИЛЬ ВІД ДВОШАРОВОГО ДІЕЛЕКТРИКА НА ПІДКЛАДЦІ

© Лящук О. Б., 2000

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

Проведено дослідження відбивання НВЧ електромагнітних хвиль від двошарового діелектрика на підкладці. Числові експерименти зроблені у важливих для практики випадках зміни товщин і електрофізичних параметрів структур. Порівняння теоретичних і експериментальних залежностей показує їх достатню узгодженість для потреб неруйнівного контролю і діагностики.

Товщинометрія і структурометрія захисних і ізолюючих покриттів, а також багатошарових пластикових матеріалів має важливе значення для авіакосмічної, машинобудівної, хімічної і будівельної промисловості а також для контролю нафто- і газопроводів, терміналів тощо. Одним з ефективних методів діагностики і неруйнівного контролю (НК) багатошарових діелектриків як на металевих, так і на діелектричних основах є радіохвильовий контроль в діапазоні НВЧ електромагнітних хвиль, який має ряд переваг перед іншими методами:

можливість як контактного, так і безконтактного контролю;

широкий діапазон вимірювань: від мкм (лакофарбові покриття) до метрів (бетонні будівельні вироби);

високу селективність і локальність контролю, а також швидкодію вимірювань;

багатопараметровість і однозначність контролю, яка реалізується, наприклад, при багаточастотних вимірюваннях.

Останнє є особливо важливим для створення багатопараметрових автоматизованих систем і мікропроцесорних приладів контролю на основі розв'язку обернених задач [1, 2].

В даній роботі проведено теоретичне дослідження прямої задачі відбивання радіохвиль НВЧ діапазону від двошарового діелектрика. Це важливо як для вивчення фізичних закономірностей відбивання зондувальних хвиль, так і при створенні алгоритмів обернених задач, в яких пряма задача багатократно використовується.

Розглянемо структуру з $M-1$ шарів діелектрика (рис. 1) скінченної товщини h_m ($m=1, 2, \dots, M-1$), розташованих між двома півпросторами $z < 0$ (вакуум) і $z > \sum_{m=1}^{M-1} h_m$ (півбезмежна діелектрична підкладка). Прийmemo, що діелектрик має плоскі границі $z=0$

(опромінювана поверхня) та $z=z_m$, $m=1, 2, \dots, M-1$, і є однорідним та ізотропним у межах кожного шару. Отже, структура разом із півбезмежною діелектричною підкладкою характеризується кількістю підобластей M та їх діелектричних параметрів, $M-1$ товщинами і в загальному вигляді може бути описана вектором

$$\vec{p} = (M, h_1, \varepsilon_1, \text{tg} \delta_1; \dots; h_i, \varepsilon_i, \text{tg} \delta_i; \dots; h_{M-1}, \varepsilon_{M-1}, \text{tg} \delta_{M-1}; \varepsilon_M, \text{tg} \delta_M), \quad (1)$$

де h_m , ε_m , $\text{tg} \delta_m$ - відповідно товщина, відносна діелектрична проникність і тангенс кута втрат m -го шару. Для розглядуваної структури магнітні проникливості шарів прийmemo рівними проникливості вакууму, що для більшості практичних випадків є справедливим.

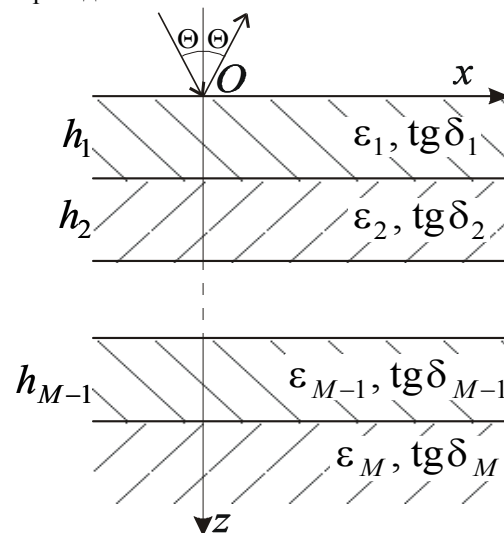


Рис. 1. Схема багатошарового діелектрика.

Нехай на поверхню $z=0$ під кутом Θ падає плоска лінійно-поляризована хвиля з часовою залежністю $\exp(i\omega t)$, xOz – площина падіння, а вектор елект-

ричної напруженості має лише складову E_y , в якій індекс надалі опускатимемо. Тоді можна записати рівняння Гельмгольца таким чином

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_m^2 \right) E_m = 0, \quad m=0, 1, \dots, M, \quad (2)$$

де $k_m^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon'_m$ – хвильове число, $\varepsilon'_m = \varepsilon_0 \varepsilon_m (1 - i \operatorname{tg} \delta_m)$ – комплексна діелектрична проникність m -го шару, ε_0, m_0 – абсолютна діелектрична і магнітна проникності вакууму, E_0 – відноситься до області $z < 0$.

Граничні умови неперервності тангенціальних складових електромагнітного поля такі:

$$\left. \begin{aligned} E_{m-1} &= E_m \\ \frac{\partial E_{m-1}}{\partial z} &= \frac{\partial E_m}{\partial z} \end{aligned} \right\}_{z=z_{m-1}}, \quad m=1, \dots, M. \quad (3)$$

З рівнянь (2-3) та умови випромінювання, яка еквівалентна існуванню при $z \rightarrow +\infty$ лише прохідної хвилі [3], використовуючи умови неперервності дотичних складових напруженостей електричного і магнітного полів отримаємо рекурентні співвідношення для знаходження комплексного коефіцієнта відбивання V , які у випадку перпендикулярного падіння електромагнітних хвиль зводяться до наступних виразів [4]:

$$V = \frac{W_0 - Y_1}{W_0 + Y_1}. \quad (4)$$

Тут Y_1 визначається залежно від кількості шарів рекурентним співвідношенням

$$Y_m = W_m \frac{Y_{m+1} (\exp q_m + 1) + W_m (\exp q_m - 1)}{W_m (\exp q_m + 1) + Y_{m+1} (\exp q_m - 1)}, \quad (5)$$

$$Y_m = W_m,$$

де $W_m = \sqrt{\varepsilon'_m / \mu_0}$, $q_m = 2i\omega h_m \sqrt{\varepsilon'_m \mu_0 (1 - \sin^2 \Theta)}$.

При перпендикулярному зондуванні плоскою електромагнітною хвилею двошарової діелектричної структури на півбезмежній підкладці для обчислення комплексних коефіцієнтів відбивання (розв'язку прямої задачі) формули для адмітансів (5) приймуть наступний простий вигляд:

$$Y_2 = W_2 \frac{W_3 (\exp q_2 + 1) + W_2 (\exp q_2 - 1)}{W_2 (\exp q_2 + 1) + W_3 (\exp q_2 - 1)}, \quad (6)$$

$$Y_1 = W_1 \frac{Y_2 (\exp q_1 + 1) + W_1 (\exp q_1 - 1)}{W_1 (\exp q_1 + 1) + Y_2 (\exp q_1 - 1)},$$

де $W_i = \sqrt{\varepsilon'_i / \mu_0}$, $i=1..3$; $q_j = 2i\omega h_j \sqrt{\varepsilon'_j \mu_0}$, $j=1,2$.

Використовуючи співвідношення (4) та (6) були проведені числові дослідження поведінки комплексного коефіцієнта відбивання від частоти та товщини окремих шарів структури.

На рис. 2 показані залежності модуля коефіцієнта відбивання $|V|$ від лінійної частоти для різних комбінацій товщин першого і другого (відносно падаючої хвилі) шарів при розташуванні діелектричної структури у вільному просторі. Електрофізичні параметри шарів наступні: $\varepsilon_1=3,9$; $\varepsilon_2=3,2$; $\operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{tg} \delta_2 = 0,02$. Кривим 1-5 відповідають наступні комбінації товщин: 1 – $h_1 = h_2 = 1$ см; 2 – $h_1 = 1$ см, $h_2 = 2$ см; 3 – $h_1 = h_2 = 2$ см; 4 – $h_1 = 2$ см, $h_2 = 3$ см; 5 – $h_1 = 4$ см, $h_2 = 2$ см. Характерно, що існують окремі частоти і навіть піддіпазони частот (наприклад, 36,5...37 ГГц і 38,2...39 ГГц), де структурам з різними товщинами шарів будуть відповідати однакові або дуже близькі між собою $|V|$, що, в загальному, не дозволяє із розв'язку прямої задачі однозначно знаходити шукані геометричні параметри. Розглянемо залежності $|V|$ від приведених до довжини падаючої на структуру хвилі, товщини першого і другого шарів (h_1, h_2) при наступних фіксованих параметрах: частоті хвилі, товщині одного із шарів і електрофізичних параметрах аналогічних попередньому випадку. На частоті $f=37,4$ ГГц (рис. 3а) можна отримати однозначну інформацію про товщину першого шару. При інших товщинах другого шару і частотах такої однозначності може і не бути (рис. 3б). Подібне спостерігається і для залежностей $|V(h_2)|$ при фіксованій товщині першого шару (рис. 4 а, б).

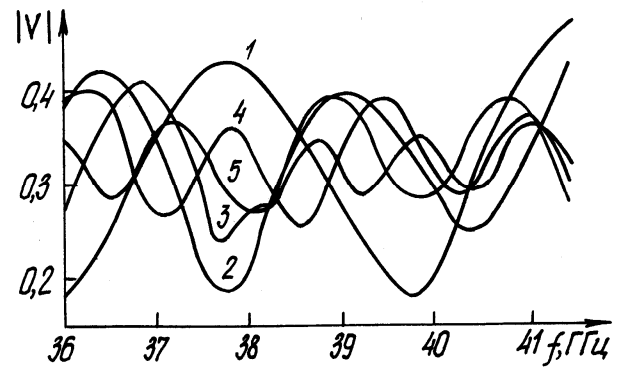
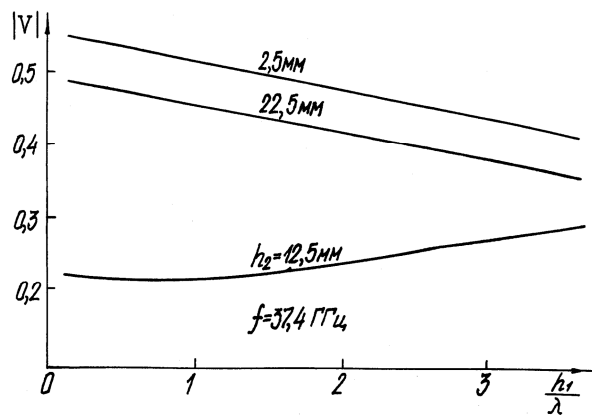
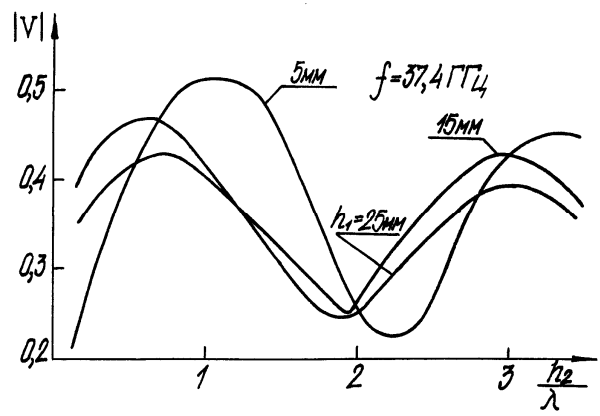


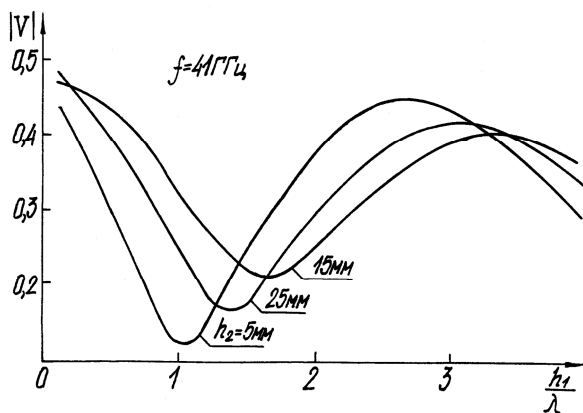
Рис. 2. Залежності модуля коефіцієнта відбивання $|V|$ від лінійної частоти f для двошарового діелектрика з різними комбінаціями товщин першого і другого шарів.



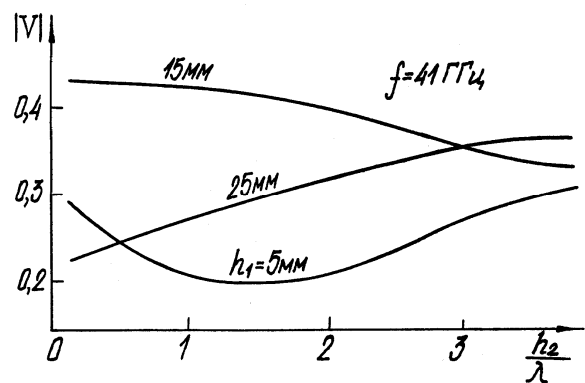
а)



а)



б)



б)

Рис. 3. Залежності $|V|$ від приведеної до довжини хвилі товщини першого шару при фіксованій товщині другого.

Рис. 4. Залежності $|V|$ від приведеної до довжини хвилі товщини другого шару.

В ряді випадків практики НК і діагностики важливою є інформація про вплив діелектричної підкладки на коефіцієнт відбиття в діапазоні частот. Таке питання виникає в задачі визначення параметрів шарів при неточно заданих параметрах підкладки. Обчислювальні експерименти були проведені в діапазонах частот $f=8\text{...}12$ ГГц для двошарового діелектрика з наступними параметрами шарів: $h_1=13$ мм; $h_2=5$ мм; $\varepsilon_1=3,9$; $\varepsilon_2=3,2$; $\text{tg } \delta_1=\text{tg } \delta_2=0,02$. На рис. 5 показані залежності $|V(f)|$ для підкладок з відносними діелектричними проникностями $\varepsilon=7; 8; 9; 10$ (криві 1–4) і тангенсами кутів втрат $\text{tg } \delta=0,1$. З рисунку видно, що зміна параметрів підкладки відносно мало позначається на $|V(f)|$ і для деяких частот (наприклад, в околі 10,25 ГГц і 11,25 ГГц) такі зміни практично не впливають на значення коефіцієнта відбиття.

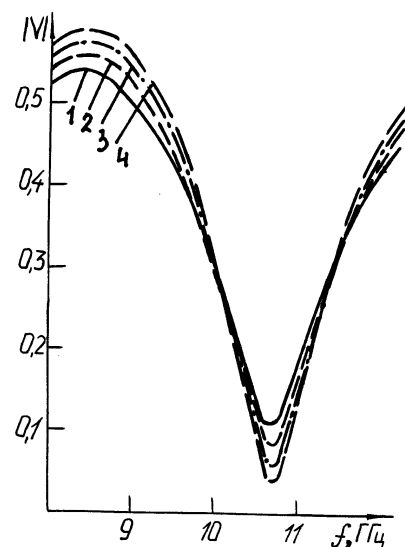


Рис. 5. Залежності $|V(f)|$ для двошарового діелектрика на підкладці з відносними діелектричними проникностями: $\varepsilon_3=7; 8; 9; 10$ (криві 1–4).

Включення до інформації про модуль коефіцієнта відбиття ще й відомостей про його фазу може значно збільшити можливості радіохвильового НК. Наприклад, на рис. 6 приведені годографи коефіцієнта відбиття для тонких верхнього і нижнього шарів ($h_1/\lambda=0,1$; $h_2\sqrt{\epsilon_2}/\lambda=0,43$) і для тангенсів кутів втрати першого шару $\text{tg } \delta_1=0,01; 0,05; 0,1; 0,2$ (криві а-г відповідно). З рис. 6 видно, що при наявності діелектричного півпростору і модуль, і фаза коефіцієнта відбиття залежать і від діелектричної проникності, і від тангенса кута втрат першого шару. Таким чином, використовуючи інформацію про модуль і фазу для тонких діелектричних покриттів, можна проводити однозначний контроль електрофізичних параметрів першого шару двошарового покриття на товстій діелектричній підкладці.

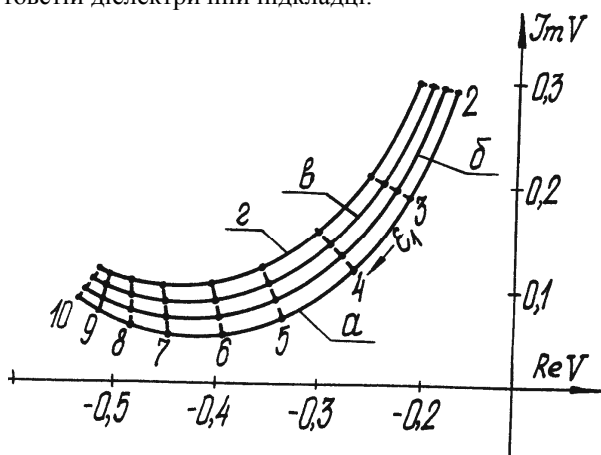


Рис. 6. Годографи коефіцієнта відбиття V для тонких верхнього і нижнього шарів. Криві а-г відповідають: $\text{tg } \delta_1=0,01; 0,05; 0,1; 0,2$.

Проведемо порівняння теоретично обчислених і вимірних відбитих сигналів K_u (коефіцієнтів стоячих хвиль за напругою), які зв'язані з модулем коефіцієнта відбиття $|V|$ наступним співвідношенням:

$$K_u = \frac{1+|V|}{1-|V|}$$

Експерименти проводилися на установці, описаній в [2] з використанням довгого пірамідального рупора. На рис. 7 показані залежності $K_u(f)$ для двошарового захисного покриття гума-склопластик зі сторони хвилі, що падає. Параметри матеріалів такі: гума – $\epsilon_1=3$; $\text{tg } \delta_1=0,02$; $h_1=18,7$ мм; склопластик – $\epsilon_2=4$; $\text{tg } \delta_2=0,005$; $h_2=3,125$ мм. Хід теоретичних (крива 1) і експериментальних (кри-

ва 2) залежностей і відповідні числові значення близькі, що достатньо для однозначного розв'язку оберненої задачі [1].

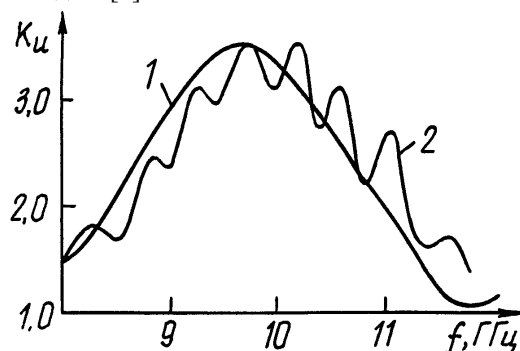


Рис. 7. Теоретичні (1) і експериментальні (2) залежності коефіцієнта стоячих хвиль за напругою $K_u(f)$ для захисного покриття гума-склопластик.

Як видно з проведених досліджень, розв'язок прямої задачі може дати однозначні результати лише у вузьких діапазонах шуканих параметрів і при наявності значної апріорної інформації. Для однозначного розв'язання задачі товщинометрії кожного із шарів двошарової структури, як і в більш складних випадках необхідно розв'язувати обернену задачу [5].

1. Kolodiy B. I. and Ljashchuk O. B. Development of methods and algorithms for non-destructive electromagnetic testing of the lamellar composites // *Advances in Fracture Resistance in Materials* / Ed. V. Panasyuk, D. M. R. Taplin, M. C. Pandey, O. Ye. Andreykiv and P. Rama Rao. - New-Delhi: Tata Mc.Graw-Hill Publishing Company Limited, 1996. - vol. 4. p. 615-622. 2. Ljashchuk O. B. Microwave Electromagnetic Non Destructive Testing of Multi-Layer Glueing Composite and Plastic Materials // *Proc. ASM International European Conference on Welding and Joing Science and Technology*. Madrid, Spain, 10-12 March, 1997, p. 457-461. 3. J.Wait, "Electromagnetic waves in stratified media", Pergamon Press, Oxford - etc., pp.608, 1970. 4. Лящук О. Б. Теоретическое исследование отражения плоской электромагнитной волны от слоистой диэлектрической структуры. Деп. N 784. - М.: ВИНТИ, 1984. - 40 с. 5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 285 с.