

## ПРИБОР РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР

© 2016 г. А.А. БАРАНОВ, В.Г. АНИСИМОВ, К.Д. ЧИЧУЛИН

Ульяновский государственный технический университет  
e-mail: uln-al-bar@yandex.ru

В процессе разработки и внедрения композитных материалов, используемых в приборостроении и электронике, возникает необходимость контроля их параметров. Одним из важнейших требований к таким материалам является его однородность. Неоднородность структуры материала влияет на его электрические параметры, например, на относительную диэлектрическую проницаемость. Для контроля электрофизических параметров композитных структур необходимо разработать прибор, способный выявлять физические неоднородности материала по его электрическим параметрам. Прибор должен работать в X-диапазоне.

Цель работы - исследование возможности реализации прибора для контроля электрофизических параметров плоских композитных структур с применением моделирования, в том числе, с использованием САПР.

Принцип работы прибора основан на измерении параметров выходного сигнала, на который влияют неоднородности композита, при распространении сигнала по прямой линии вдоль полоска. При замере по нескольким линиям  $l$  получаем одномерную функцию зависимости параметра от положения линии замеров  $f_1(p)$ . Поворачивая образец и проводя новые замеры получаем несколько проекций, которые объединяем в функцию зависящую от угла поворота и расстояния до точки вращения  $f_1(\varphi, p)$ . Для получения двумерной функции распределения неоднородностей влияющих на измеренный параметр  $f_2(x, y)$  необходимо применить инверсное преобразование Радона (рис. 1). Для этого необходимо, чтобы воздействия неоднородностей на параметр имели накопительный характер, т.е.  $f_1 = \int f(x, y) dl$ .

Один из вариантов записи обратного преобразования Радона:

$$f_2(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} e^{i\omega(x \cdot \cos\alpha + y \cdot \sin\alpha)} \cdot \tilde{R}(\omega, \alpha) d\omega d\alpha, \quad (1)$$

где

$$\tilde{R}(\omega, \alpha) = \int_{-\infty}^\infty f_1(\varphi, p) e^{i\omega p} dp; \quad (2)$$

Для проверки применимости теории для поставленной задачи было проведено моделирование без учета электрофизических параметров материалов в среде Matlab. На рис. 2 представлен образец материала с неоднородностями. Результат восстановления

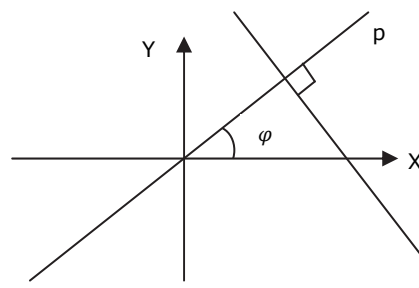


Рис. 1. Пояснение к описанию преобразования Радона.

ления картины неоднородностей с применением рассматриваемого метода приведен на рис. 3.



Рис. 2. Образец материала с неоднородностями.

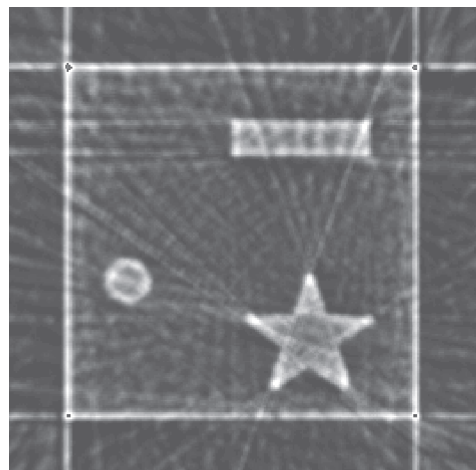


Рис. 3. Восстановленная картина объекта.

Была разработана конструкция прибора. В состав прибора входит измерительный элемент, представляющий собой полосок, расположенный на подвижной диэлектрической подложке, над которой минимально малым зазором располагается исследуемый материал, закреплённый на вращающейся рамке, генератор, детектор, модуль управления.

Полосок перемещается вдоль исследуемого образца, и при каждом перемещении измеряется определённый параметр выходного сигнала. Затем образец поворачивается на заданный угол и процесс повторяется.

С точки зрения электродинамики неоднородность представляет собой включённый последовательно в линию передачи (полосок) отрезок линии передачи с изменёнными параметрами.

Примем за нулевое значение вносимый фазовый сдвиг  $\Delta\varphi_0$  при прохождении электромагнитной волной полоска длиной  $l_{\Pi}$ , равный:

$$\Delta\varphi_0 = \beta_0 l_{\Pi} = 2\pi \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}\varphi_0}}}{\lambda} l_{\Pi}, \quad (3)$$

где  $\beta_0$  - коэффициент фазы однородной полосковой линии (композитный материал однородный);  $\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}\varphi_0}}$  - эффективная диэлектрическая проницаемость однородной полосковой линии;  $\lambda$  - длина волны в свободном пространстве.

При наличии в композитном материале неоднородности электромагнитная волна при прохождении полоска той же длины получит дополнительный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$ , равный:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}\varphi_1}}}{\lambda} l_H, \quad (4)$$

где  $\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}\varphi_1}}$  - эффективная диэлектрическая проницаемость участка полосковой линии, находящейся вблизи неоднородности;  $l_H$  - участка полосковой линии, находящейся вблизи неоднородности.

По изменению фазового сдвига можно судить о наличии неоднородности, по величине дополнительного фазового сдвига можно оценить размер неоднородности, а положение неоднородности определяется по методу, описанному выше.

Было проведено моделирование в среде AWR Microwave Office. Неоднородность моделировалась отверстием в плоском композитном материале. Исследуемая конструкция представлена на рис. 4.

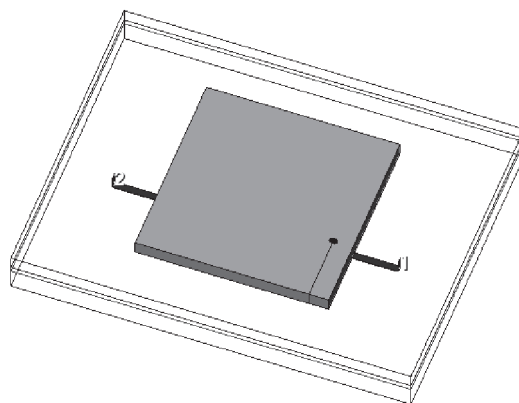


Рис. 4. 3D модель измерительного элемента с композитом.

Выходными параметрами, по которым оценивалось наличие неоднородности, были выбраны КСВ на входе полосковой линии, входное сопротивление и фаза коэффициента передачи. В ходе каждого исследования сначала неоднородность перемещали вдоль полоска, затем изменяли её размер. Результаты исследований приведены на рис. 5, рис. 6, рис. 7.

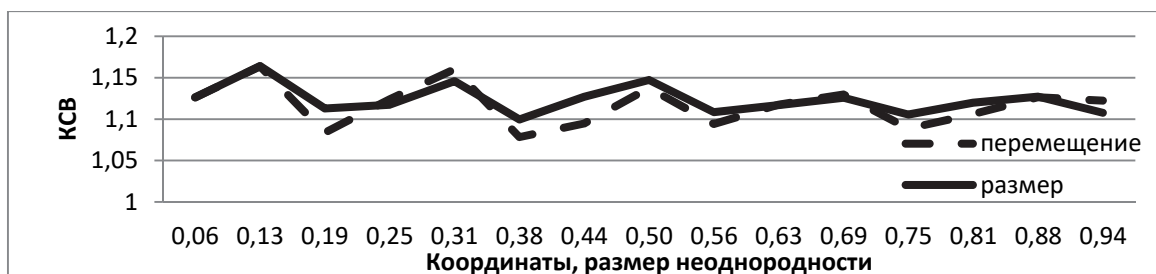


Рис. 5. Зависимости КСВ.

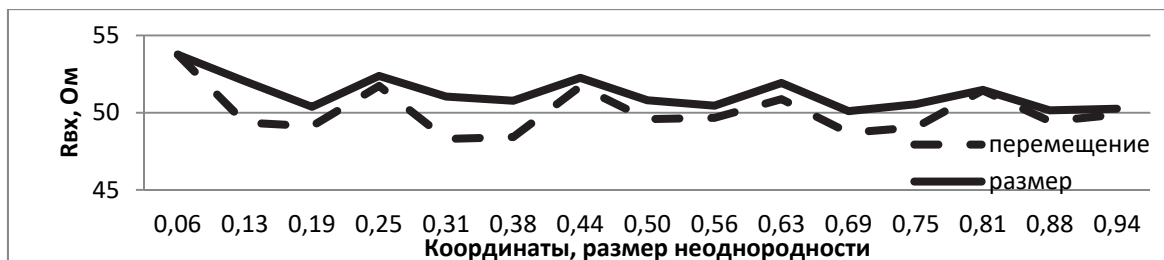


Рис. 6. Зависимости  $R_{вх}$ .

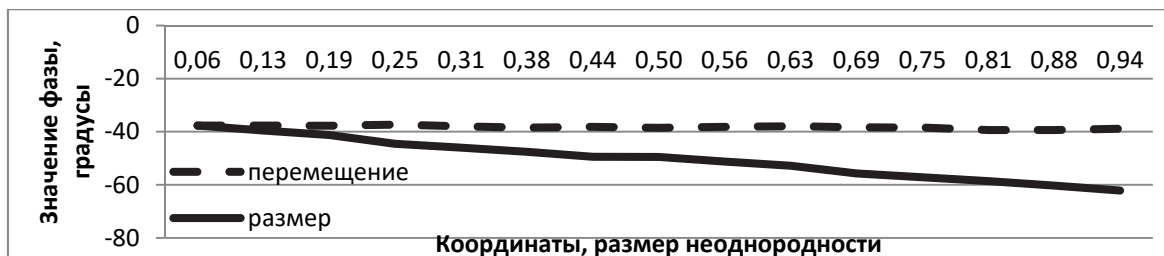


Рис. 7. Зависимости  $\varphi$ .

С учётом полученных результатов было установлено, что характеристики параметров КСВ и  $R_{вх}$  не удовлетворяют требованиям применяемой в работе прибора теории по причине их немонотонной зависимости от размера, а также от положения неоднородности. Из этого следует необходимость использования в качестве выходного па-

раметра фазы коэффициента передачи для определения функции  $f_1(\varphi, p)$ , так как на ее значение не влияет положение неоднородности и она линейно зависит от размера неоднородности.

На рис. 8 приведены значения фазы коэффициента передачи  $\varphi$  для каждого положения полоска, полученные в ходе моделирования. Из результатов моделирования видно изменение значения  $\varphi$  в районе неоднородности композитного материала, совпадающей с 30-м шагом полоска:



Рис. 8. Зависимость значения  $\varphi$  от положения полоска.

**Вывод:** результаты моделирования в AWR Microwave Office показали правильность выбора параметра  $\varphi$  для определения наличия неоднородностей с применением микрополосковой линии. Также подтверждена теоретическая возможность получения карты неоднородностей на основе полученных данных при помощи обратного преобразования Радона. Тем самым была доказана реализуемость прибора радиоволнового контроля электрофизических параметров композитных материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983, с. 308-318.
2. Малорацкий А.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. — М.: Советское радио, 1972. — 232 с.
3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью MicrowaveOffice, Солон-Пресс, 2003. - 496 с.