

Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн

А. И. Казьмин, П. А. Федюнин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация, e-mail: alek-kazmin@yandex.ru, fpa1@yandex.ru

Рассмотрена одна из важнейших проблем диагностики многослойных диэлектрических материалов и покрытий – разработка методов количественной интерпретации результатов контроля электрофизических и геометрических параметров этих материалов. Представлены результаты исследования потенциальной информативности многочастотного радиоволнового метода поверхностных медленных электромагнитных волн при реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий. Представлена имитационная модель, позволяющая оценить точность реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий. В модели учитываются значения электрофизических и геометрических параметров покрытия, уровень шума в измерительных данных и ширина полосы частот измерений. Приведены результаты имитационного моделирования и экспериментальной проверки реконструкции относительных диэлектрических проницаемостей и толщин одно- и двухслойных разнотолщинных диэлектрических покрытий на основе полиметилметакрилата, фторопласта Ф-4Д, РО3010 при различных значениях среднего квадратического отклонения уровня шума в измеренных коэффициентах ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны. Установлено, что точность реконструкции геометрических и электрофизических параметров слоёв уменьшается с увеличением числа оцениваемых параметров и уровня шума, а также с уменьшением диэлектрической проницаемости и толщины слоёв. Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность разработанной имитационной модели. Представленная модель позволяет для конкретного измерительного комплекса, реализующего многочастотный радиоволновый метод поверхностных медленных электромагнитных волн, количественно оценить потенциально возможную точность реконструкции геометрических и электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Согласно результатам имитационного моделирования и экспериментального исследования многослойного диэлектрического покрытия, при ширине полосы частот измерений 1 ГГц погрешности оценок диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв составляют не более 10 % с вероятностью 0,95 при среднем квадратическом отклонении уровня шума 0,003–0,004.

Ключевые слова: многослойное диэлектрическое покрытие, многочастотный радиоволновый метод поверхностных медленных электромагнитных волн, имитационная модель, обратная задача, коэффициент ослабления поля поверхностной медленной электромагнитной волны, диэлектрическая проницаемость.

Введение. Постановка задачи. Многослойные диэлектрические материалы и покрытия широко применяются в различных областях науки и техники при работе в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Эффективность таких покрытий определяется их электрофизическими и геометрическими параметрами (ЭФГП). Таким образом, разработка новых методов измерения ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий, а также обнаружение межслойных дефектов покрытий является актуальной научной задачей.

В работах [1–5] показано, что повысить эффективность контроля ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий можно, применив метод квази-решений в рамках многочастотной (широкополосной) СВЧ-интроскопии. В качестве информативного параметра для оценки ЭФГП слоёв при этом используют комплексный коэффициент отражения $\hat{R}(f, \xi)$, где f – частота зондирующего сигнала; $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$, $i = 1, \dots, 2n$ – $2n$ -мерный вектор, описывающий ЭФГП n -слойного материала;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; $b_{n+1}=(t_{n+1}/\lambda)_{n+1}, \dots, b_{2n}=(t_{2n}/\lambda)_{2n}$ – относительные толщины слоёв n -слойного материала; $t_{n+1}, \dots, t_{2n}$ – толщины слоёв материала; λ – длина волны зондирующего сигнала.

Между тем, потенциальные возможности применения метода квазирешений [1–5] для оценки ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий не исследованы при других типах взаимодействия электромагнитного поля с исследуемыми материалами и, соответственно, с другими измеряемыми информативными параметрами. Как показано в работе [6], использование в качестве информативного параметра коэффициента $\alpha(f, \xi)$ ослабления поля поверхностных медленных электромагнитных волн (далее – коэффициента ослабления поля), который определяется в результате косвенных измерений, позволяет повысить точность и достоверность реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Под повышением достоверности понимают повышение точности оценки ЭФГП слоёв путём учёта частотной дисперсии электрофизических параметров и уменьшения ширины полосы частот измерений.

Цель работы – численное исследование и экспериментальная проверка потенциальной информативности много-частотного радиоволнового метода поверхностных медленных электромагнитных волн при реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий с учётом параметров материала покрытия, уровня шума в измерительных данных и ширины полосы частот измерений.

Имитационная модель реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических материалов и покрытий. При таком моделировании на ЭВМ выполняется совокупность расчётов, позволяющих имитировать процесс реконструкции, т. е. восстановления значений относительных диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв многослойного диэлектрического покрытия по экспериментально полученным значениям коэффициентов ослабления поля $\alpha_3(f, \xi)$.

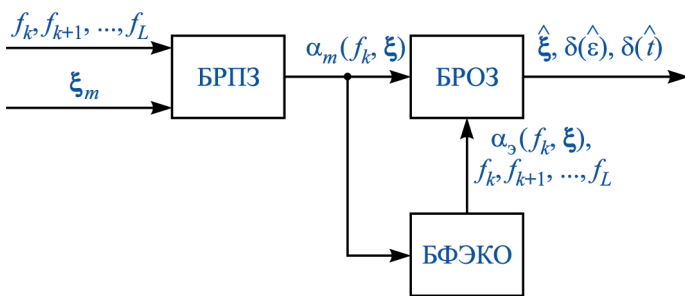


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели:

БРПЗ, БРОЗ – блоки решения прямой и обратной задач соответственно; БФЭКО – блок формирования экспериментальных коэффициентов ослабления поля поверхностной электромагнитной волны

Fig. 1. Block diagram of a simulation model:

BSDP, BIPS – blocks for solving the direct and inverse problems, respectively; BGEAC – block for generating experimental attenuation coefficients of the surface electromagnetic wave

Для моделирования разработана имитационная модель измерительного комплекса [6–8], структурная схема которой приведена на рис. 1. В состав имитационной модели входят три блока: блок решения прямой задачи БРПЗ, позволяющий определять теоретические значения $\alpha_T(f_k, \xi)$ коэффициентов ослабления поля для частот $f_k, k=1, 2, \dots, L$, и вектора ЭФГП $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$; блок формирования экспериментальных значений $\alpha_3(f_k, \xi), k=1, 2, \dots, L$, коэффициентов ослабления поля БФЭКО, имитирующий абсолютные погрешности $\Delta\alpha(f_k, \xi)$ измерений коэффициента ослабления поля; блок решения обратной задачи БРОЗ, реализующий нахождение минимума целевой функции.

В блоке БРПЗ рассчитываются теоретические значения коэффициентов ослабления $\alpha_T(f, \xi)$ многослойного диэлектрического покрытия путём решения дисперсионного уравнения по известному вектору ЭФГП $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}$ на частотах $f_k, k=1, 2, \dots, L$ [6]:

$$D[\alpha_T(f_k, \xi); f_k] = 0. \quad (1)$$

В блоке БРОЗ реализуется представленный в [6] метод определения вектора ЭФГП $\xi = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, b_{n+1}, \dots, b_{2n}\}, i=1, \dots, 2n$ многослойных диэлектрических материалов и покрытий. Метод основан на минимизации целевой функции, построенной по невязке между полученными экспериментально $\alpha_3(f, \xi)$ и вычисленными теоретически значениями $\alpha_T(f, \xi)$ коэффициентов ослабления поля на частотах $f_k, k=1, 2, \dots, L$:

$$\xi = \underset{\xi \in \xi_{\text{доп}}}{\operatorname{argmin}} \rho(\xi) = \sum_{k=1}^L \left| \frac{\alpha_3(f_k, \xi) - \alpha_T(f_k, \xi)}{\alpha_T(f_k, \xi)} \right|^2, \quad (2)$$

где $\rho(\xi)$ – расстояние между значениями $\alpha_3(f, \xi)$ и $\alpha_T(f, \xi)$ в области допустимых значений $\xi \in \xi_{\text{доп}}$.

Решение обратной задачи (2) является некорректным [6]. Регуляризация задачи сводится к жёстким ограничениям области допустимых значений составляющих вектора ЭФГП (границы области допустимых значений составляющих вектора ЭФГП $\xi_i \in [\xi_{i\min}, \dots, \xi_{i\max}]$ отличаются от истинных значений не более чем на 10 %). Для повышения устойчивости решения обратной задачи (2) без использования жёстких ограничений области допустимых значений составляющих вектора ЭФГП в целевую функцию (2) добавлен дополнительный стабилизатор $q_i \|\xi_i - \xi_{i0}\|^2$ с параметром регуляризации ϖ [9]:

$$\xi = \underset{\xi \in \xi_{\text{доп}}}{\operatorname{argmin}} \rho(\xi) = \sum_{k=1}^L \left| \frac{\alpha_3(f_k, \xi) - \alpha_T(f_k, \xi)}{\alpha_T(f_k, \xi)} \right|^2 + \varpi \sum_{i=1}^{2n} q_i \|\xi_i - \xi_{i0}\|^2, \quad (3)$$

где q_i – вес, определяющий степень априорной информации о каждой составляющей вектора ЭФГП; ξ_i – i -я составляющая вектора ЭФГП; ξ_{i0} – найденное с учётом априорной информации о составляющей среднее значение i -й составляющей вектора ЭФГП из области допустимых значений $\xi_{i0} \in [\xi_{i\min}, \dots, \xi_{i\max}]$.

Проведённые исследования показали, что при числе слоёв диэлектрического покрытия больше трёх прямые алгоритмы минимизации целевой функции (3) перестают давать устойчивые оценки ЭФГП и целесообразно использовать алгоритмы стохастической минимизации, например генетический алгоритм. Поэтому при имитационном моделировании для минимизации функционала (3) применяли генетический алгоритм, реализованный в виде функции «ga» приложения Global Search системы Matlab.

В общем случае коэффициенты ослабления $\alpha_{\Sigma}(f, \xi)$ наблюдаются в эксперименте при аддитивных случайных помехах и их можно представить в виде [1, 3]:

$$\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi) = \alpha_T(f_k, \xi) + n(f_k), \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (4)$$

где $n(f_k)$ – шум, обусловленный как погрешностями самого физического прибора и другими измерительными погрешностями при проведении эксперимента, так и достоверностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации; L – число частот, на которых проводятся измерения.

Ввиду множества случайных факторов, влияющих на точность реконструкции ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий, погрешность их измерения в блоке БФЭКО моделировали аддитивным некоррелированным гауссовым шумом $n(f_k)$ с нулевым математическим ожиданием $m(n(f_k))=0$ и заданным уровнем дисперсии σ_n^2 . Формировали искажённые значения результатов измерений частотной зависимости коэффициента ослабления поля:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\Sigma}(f_k, \xi) &= \alpha_T(f_k, \xi) + n(f_k); \\ m(n(f_k)) &= 0; \\ k &= 1, 2, \dots, L. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, в соответствии с принятой моделью нормального распределения погрешностей измерений (5), имитировали абсолютные погрешности измерений $\Delta\alpha(f_k, \xi)$.

Блоки структурной схемы имитационного моделирования реализованы в виде подпрограмм в системе Matlab.

Описание имитационного моделирования реконструкции ЭФГП диэлектрических покрытий. Имитационное моделирование включает следующее. По принятым точным значениям толщин $t_1, t_{i+1}, \dots, t_n$ и относительных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_1, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_n$, $i=1, \dots, n$ n -слойного диэлектрического покрытия вычисляли теоретические значения коэффициентов ослабления $\alpha_T(f_k, \xi)$ для каждой из f_k фиксированных частот, решая дисперсионное уравнение (1).

Полученные при моделировании значения $\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi)$ представляли в качестве регистрируемой величины в целевую функцию (3). Далее в блоке БРОЗ оптимизировали выражение (3). Точность реконструкции относительных диэлектрических проницаемостей и толщин исследуемых диэлектрических покрытий исследовали при возрастающих значениях среднего квадратического отклонения (СКО) шума 0–0,008. По 300 реализациям каждого значения СКО шума

определяли средние значения относительных погрешностей оценки относительных диэлектрических проницаемостей $\delta(\varepsilon_i)$ и толщин слоёв $\delta(t_i)$, $i=1, \dots, n$ – число слоёв диэлектрического покрытия.

В качестве материалов для исследования выбраны диэлектрики – полиметилметакрилат ($\varepsilon=2,7$), фторопласт Ф-4Д ($\varepsilon=2,2$), а также СВЧ-материал RO3010 (Rogers Corporation, USA) ($\varepsilon=11,2$). Толщина материалов 1–3 мм. Также при имитационном моделировании исследователи диэлектрические материалы с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=1,2 \dots 20$.

Для определения значений СКО уровня шума в данных, измеренных с помощью реального измерительного комплекса [6], оценивали закон распределения экспериментальных значений $\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi)$ коэффициентов ослабления поля на стандартном образце полиметилметакрилата толщиной 1 мм ($\varepsilon=2,7$) и образце материала с более высоким значением диэлектрической проницаемости – RO3010 ($\varepsilon=11,2$). Диапазон частот измерений составил 9–12 ГГц с дискретным шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$). На каждой частоте формировали выборку из 500 значений $\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi)$. Для аппроксимации закона распределения экспериментальных данных использовали метод модернизированных распределений Пирсона [10, 11]. Расчётные оценки показали, что плотность распределения вероятностей коэффициентов ослабления поля в диапазоне частот 9–12 ГГц для стандартного образца полиметилметакрилата описывается распределением Пирсона VII типа, что соответствует нормальному закону распределения с СКО $\sigma(f_k, \xi)=0,0015 \dots 0,0018$:

$$p[\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(f_k, \xi)} \exp \left[-\frac{\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi) - m[\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi)]^2}{2\sigma(f_k, \xi)^2} \right], \quad (6)$$

где $m[\alpha_{\Sigma}(f_k, \xi)]$ – математическое ожидание коэффициента ослабления образца полиметилметакрилата на частоте f_k ; $\sigma(f_k, \xi)$ – СКО коэффициента ослабления поля на частоте f_k .

Плотность распределения вероятностей для образца RO3010, также подчиняется нормальному закону (6) с меньшим значением СКО $\sigma(f_k, \xi)=0,0014 \dots 0,0017$.

Проверка правильности согласованности экспериментальных данных нормальному закону распределения осуществлялась по критерию χ^2 Пирсона в системе Matlab. Полученные значения СКО распределения коэффициентов ослабления приняли в качестве экспериментального значения уровня шума для сравнения с результатами имитационного моделирования.

Результаты решения обратной задачи (3) при других значениях СКО уровня шума измеренных данных исследовали методом имитационного моделирования на ЭВМ.

Экспериментальные результаты реконструкции ЭФГП одно- и двухслойных покрытий. Однослойное диэлектрическое покрытие. Поскольку разрешающая способность метода реконструкции ЭФГП материалов слоёв многослойных диэлектрических структур определяется в основном слоем с наименьшей электрической толщиной [2], то в первую очередь изучали параметры однослойного диэлектрического покрытия.

Эта (однослойная) структура является базовой для дальнейших исследований. При численном моделировании и обработке результатов реальных экспериментов теоретические значения коэффициента ослабления для целевой функции (3) определяли на основе решения дисперсионного уравнения (1) для однослойного диэлектрического покрытия. Согласно методу поперечного резонанса для однослойного диэлектрического покрытия использовали следующий вид дисперсионного уравнения [6, 12–15]:

$$D[\alpha(f, \xi); f] \equiv \bar{Z}(1, 0) = 0; \quad (7)$$

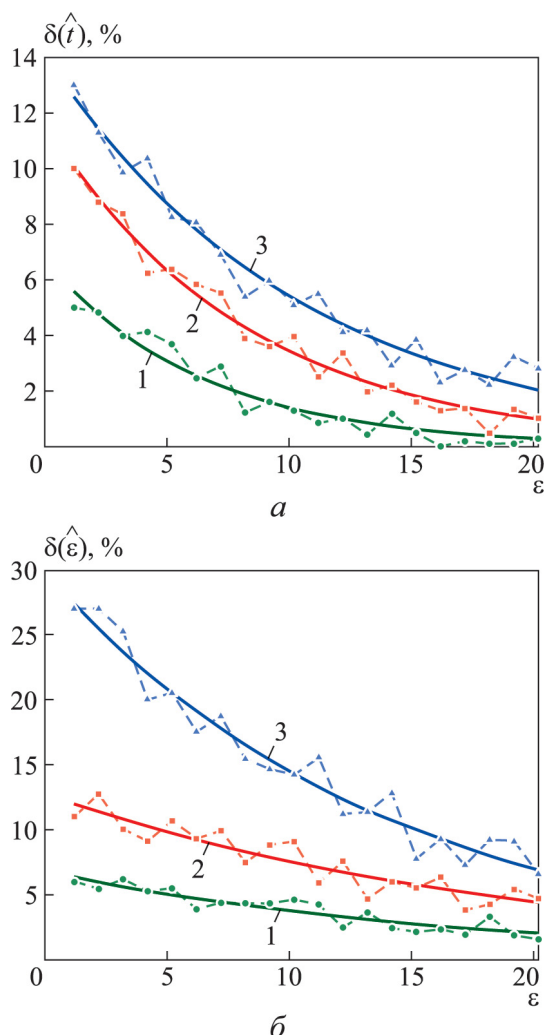


Рис. 2. Зависимости средней относительной погрешности оценки диэлектрической проницаемости (а) и толщины (б) однослойного покрытия толщиной $b=1$ мм от его диэлектрической проницаемости при фиксированных значениях СКО шума $\sigma=0,001$ (1); $0,003$ (2); $0,005$ (3)

Fig. 2. The dependence of the average relative error in the estimation of permittivity (a) and thickness (b) of a single-layer coating with the thickness of $b=1$ mm on the value of its permittivity, for fixed values of the standard deviation of noise $\sigma=0,001$ (1); $0,003$ (2); $0,005$ (3)

$$\bar{Z}(1, 0) = Z_1 \frac{Z_0 + jZ_1 \operatorname{tg}(qt)}{Z_1 + jZ_0 \operatorname{tg}(qt)},$$

где $\bar{Z}(1, 0)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление слоя покрытия и области над покрытием; $Z_0 = -j\alpha_T(f, \xi)/(\omega\epsilon_0)$ – характеристическое сопротивление на границе между слоем диэлектрика и свободным пространством; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; $Z_1 = q/(\omega\epsilon_0\epsilon)$ – характеристическое сопротивление слоя покрытия; $q = \sqrt{k^2 - k_0^2 - \alpha_T^2(f, \xi) + \beta^2}$ – поперечное волновое число, характеризующее распределение поля поверхностной медленной электромагнитной волны по толщине t покрытия; $k_0 = 2\pi/\lambda$, $k = 2\pi\sqrt{\epsilon}/\lambda$ – волновые числа свободного пространства и слоя покрытия соответственно; $\beta = m2\pi/d$ – поперечное волновое число, характеризующее распределение поля поверхностной медленной электромагнитной волны по ширине d покрытия.

В методах реконструкции ЭФГП на основе комплексного коэффициента отражения погрешности оценок ЭФГП слоёв существенно зависят от значений ЭФГП. Поэтому оценивали значения погрешностей $\delta(\hat{\epsilon})$, $\delta(\hat{t})$ при увеличении значений ЭФГП и заданном уровне СКО уровня шума.

На рис. 2 представлены зависимости средних относительных погрешностей $\delta(\hat{\epsilon})$, $\delta(\hat{t})$ однослойного покрытия толщиной $t=1$ мм от его диэлектрической проницаемости, при фиксированных значениях СКО шума $\sigma=0,001$ (1); $0,003$ (2); $0,005$ (3). Зависимости построены с помощью функций регрессии «gauss1» и «exp1» приложения Curve Fitting Toolbox системы Matlab.

Анализ зависимостей рис. 2 для однослойного диэлектрического покрытия показывает, что относительные погрешности оценок диэлектрической проницаемости слоя $\delta(\hat{\epsilon})$ и толщины $\delta(\hat{t})$ при фиксированных значениях уровня СКО шума и толщины слоя уменьшаются с увеличением диэлектрической проницаемости. При этом точность оценки толщины слоя в 2–2,5 раза выше точности оценки диэлектрической проницаемости.

По результатам имитационного моделирования получили оценки диэлектрической проницаемости и толщины однослойного покрытия при СКО уровня шума $\sigma=0,003$ во всём диапазоне исследуемых значений диэлектрической проницаемости ($\epsilon=1,2 \dots 20$) с погрешностью не более 10 % при доверительной вероятности 0,95.

Экспериментальные значения погрешности $\delta(\hat{\epsilon})$ оценки диэлектрической проницаемостей однослойных покрытий толщиной 1 мм на основе полиметилметакрилата ($\epsilon=2,7$), фторопласта Ф-4Д ($\epsilon=2,2$) и РО3010 ($\epsilon=11,2$), полученные на измерительном комплексе [6], составили 6, 7 и 5 % соответственно, погрешности оценки толщин слоя – 5, 6 и 4 % соответственно.

Сравнение с экспериментально полученным значением СКО уровня шума $\sigma=0,0015 \dots 0,0020$ и значениями экспериментальных погрешностей оценки ЭФГП подтверждает практическую работоспособность многочастотного радиоволнового метода поверхностных медленных электромагнитных волн и адекватность работы имитационной модели.

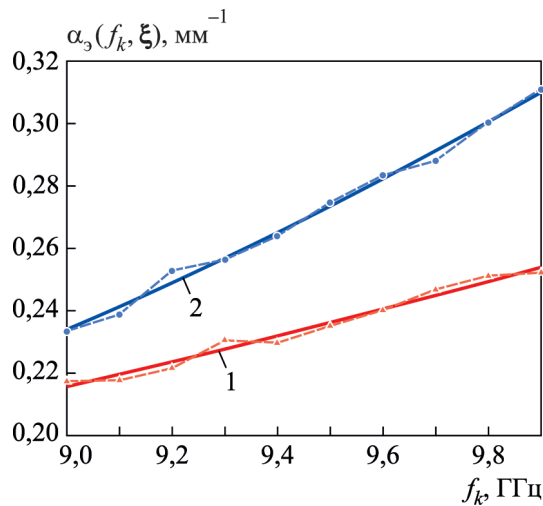


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента ослабления $\alpha_3(f_k, \xi)$ от частоты для покрытий «полиметилметакрилат–RO3010» (1) и «RO3010–полиметилметакрилат» (2)

Fig. 3. The experimental frequency dependence of the field attenuation coefficient $\alpha_3(f_k, \xi)$ on the frequency for the coating "polymethyl methacrylate–RO3010" (1) and coating "RO3010–polymethyl methacrylate" (2)

С увеличением толщины слоя при фиксированных значениях диэлектрической проницаемости и СКО уровня шума погрешность оценок диэлектрической проницаемости $\delta(\hat{\epsilon})$ и толщины слоя $\delta(\hat{t})$ однослойного покрытия также уменьшается.

Двухслойное диэлектрическое покрытие. Дисперсионное уравнение для двухслойной диэлектрической структуры усложняется наличием ещё одной границы раздела сред между первым и вторым слоем покрытия. Теоретические значения коэффициента ослабления для двухслойного покрытия определяли при решении дисперсионного уравнения [6, 12–15]:

$$D[\alpha(f, \xi); f] \equiv \bar{Z}(1, 2, 0);$$

$$\bar{Z}(1, 2, 0) = \bar{Z}(1, 2) \frac{Z_0 + j\bar{Z}(1, 2)\operatorname{tg}(q_2 t_2)}{\bar{Z}(1, 2) + jZ_0 \operatorname{tg}(q_2 t_2)};$$

$$\bar{Z}(1, 2) = Z_1 \frac{Z_2 + jZ_1 \operatorname{tg}(q_1 t_1)}{Z_1 + jZ_2 \operatorname{tg}(q_1 t_1)},$$

где $\bar{Z}(1, 2, 0)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление 1-го, 2-го слоёв диэлектрического покрытия и области над покрытием; $\bar{Z}(1, 2)$ – эквивалентное характеристическое сопротивление 1-го и 2-го слоёв диэлектрического покрытия; $Z_1 = q_1/(\omega \epsilon_0 \epsilon_1)$, $Z_2 = q_2/(\omega \epsilon_0 \epsilon_2)$ – характеристические сопротивления 1-го и 2-го слоёв покрытия; $q_1 = \sqrt{k_1^2 - k_0^2 - \alpha_1^2(f, \xi) + \beta^2}$, $q_2 = \sqrt{k_2^2 - k_0^2 - \alpha_2^2(f, \xi) + \beta^2}$ – поперечные волновые числа 1-го и 2-го слоёв покрытия, $k_1 = 2\pi\sqrt{\epsilon_1}/\lambda$, $k_2 = 2\pi\sqrt{\epsilon_2}/\lambda$ – волновые числа 1-го и 2-го слоёв покрытия; t_1 , t_2 – толщины 1-го и 2-го слоёв покрытия.

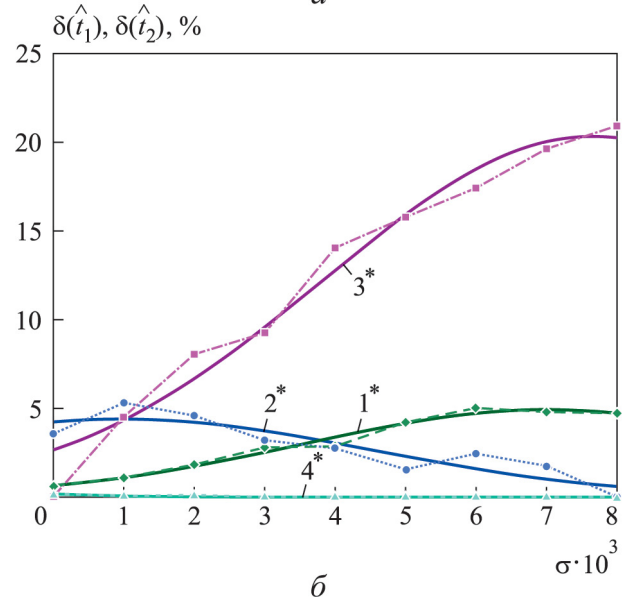
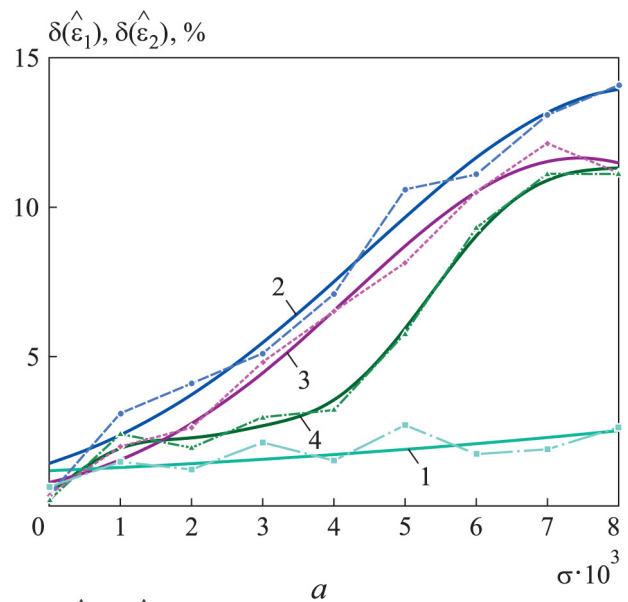


Рис. 4. Зависимости средней относительной погрешности оценок относительной диэлектрической проницаемости (а) и толщины (б) слоёв двух двухслойных диэлектрических покрытий при увеличении СКО уровня шума:

1, 2, 1*, 2* – соответственно оценки $\delta(\hat{\epsilon}_1)$, $\delta(\hat{\epsilon}_2)$ и $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ покрытия «RO3010–полиметилметакрилат»; 3, 4, 3*, 4* – соответственно оценки $\delta(\hat{\epsilon}_1)$, $\delta(\hat{\epsilon}_2)$ и $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ покрытия «полиметилметакрилат–RO3010»

Fig. 4. The dependences of the average relative error in the estimates of permittivity (a) and thickness (b) of layers of the two two-layer dielectric coatings with an increase in the standard deviation of the noise level:

1, 2, 1*, 2* – estimations of $\delta(\hat{\epsilon}_1)$, $\delta(\hat{\epsilon}_2)$ and $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ of the coating "RO3010–polymethyl methacrylate"; 3, 4, 3*, 4* – estimations of $\delta(\hat{\epsilon}_1)$, $\delta(\hat{\epsilon}_2)$ and $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ of the coating "polymethyl methacrylate–RO3010"

Изучали наиболее сложный случай, когда двухслойное покрытие является высококонтрастным по диэлектрической проницаемости. Исследовали образцы двухслойных

Матрица корреляционных коэффициентов

Δf , ГГц	ξ	R			
		b_1	ε_1	b_2	ε_2
1	b_1	1,0	-0,367	-0,115	0,190
	ε_1	—	1,0	-0,862	-0,262
	b_2	—	—	1,0	0,09
	ε_2	—	—	—	1,0
2	b_1	1,0	-0,541	-0,268	0,220
	ε_1	—	1,0	-0,541	-0,483
	b_2	—	—	1,0	-0,112
	ε_2	—	—	—	1,0

(толщина слоёв 2 мм) покрытий на основе полиметилметакрилата ($\varepsilon=2,7$) и СВЧ-материала RO3010 ($\varepsilon=11,2$). Изучаемые образцы покрытий различались расположением слоёв: «RO3010–полиметилметакрилат» (первый образец), «полиметилметакрилат–RO3010» (второй образец). Коэффициент ослабления поля, как и в случае однослойного покрытия, измеряли в диапазоне частот 9–10 ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$). На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости коэффициента ослабления $\alpha_3(f_k, \xi)$ от частоты для покрытий «Rogers RO 3010–полиметилметакрилат» и «полиметилметакрилат–Rogers RO 3010». Экспериментальное значение уровня СКО шума принимали $\sigma=0,002$. Указанные зависимости для двух покрытий существенно различаются, что позволяет надёжно определять порядок сочетания слоёв двухслойного покрытия.

На рис. 4, а приведены зависимости относительной погрешности оценок диэлектрической проницаемости $\delta(\hat{\varepsilon}_1)$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)$ слоёв толщиной 2 мм двухслойных покрытий «RO3010–полиметилметакрилат» и «полиметилметакрилат–RO3010» при возрастании уровня СКО шума измерительных данных в диапазоне 0–0,008. На рис. 4, б показано, как при этих условиях изменяется погрешность оценки толщин слоёв $\delta(\hat{t}_1)$, $\delta(\hat{t}_2)$ указанных покрытий. Зависимости на рис. 4 (как и на рис. 2) построены с помощью функций регрессии «gauss1» и «exp1» приложения Curve Fitting Toolbox системы Matlab.

Из анализа зависимостей рис. 4 следует, что увеличение числа оцениваемых ЭФГП приводит к увеличению их относительных погрешностей. Погрешности оценок параметров слоёв двухслойного покрытия не совпадают с оценками для однослойного покрытия, однако сохраняется установленная для базового слоя общая закономерность – погрешности оценок диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв уменьшаются с увеличением значений диэлектрической проницаемости и электрической толщины слоя.

Получены устойчивые оценки относительных погрешностей ЭФГП слоёв двухслойного покрытия не больше 10 % при уровне СКО шума $\sigma \geq 0,003$ с доверительной вероятностью 0,95. Экспериментальные значения относительных погрешностей оценок

относительных диэлектрических проницаемостей и толщин слоёв для покрытия «RO3010–полиметилметакрилат» составляют $\delta(\hat{\varepsilon}_1)=3\%$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)=7\%$, $\delta(\hat{t}_1)=2\%$, $\delta(\hat{t}_2)=6\%$, для покрытия «полиметилметакрилат–RO3010» $\delta(\hat{\varepsilon}_1)=4\%$, $\delta(\hat{\varepsilon}_2)=5\%$, $\delta(\hat{t}_1)=8\%$, $\delta(\hat{t}_2)=5\%$. Отличие оценок ЭФГП отдельных слоёв от ЭФГП однослойного покрытия объясняется появлением дополнительных корреляционных связей между параметрами слоёв.

С учётом линейности зависимости коэффициента ослабления от частоты [6] для более явного выделения взаимосвязей контролируемых ЭФГП двухслойного диэлектрического покрытия вычисляли его нормированную корреляционную матрицу R оцениваемых ЭФГП [1, 3]:

$$R = \begin{vmatrix} 1 & r_{1,2} & \dots & r_{1,2n-1} & r_{1,2n} \\ r_{2,1} & 1 & \dots & r_{2,2n-1} & r_{2,2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{2n,1} & r_{2n,2} & \dots & r_{2n,2n-1} & 1 \end{vmatrix},$$

где r_{ij} – нормированные корреляционные коэффициенты пар электрофизических параметров $\hat{\xi}_i, \hat{\xi}_j$, $i=1, \dots, 2n$, $j=1, \dots, 2n$; $2n$ – число оцениваемых ЭФГП диэлектрического покрытия (относительных диэлектрических проницаемостей и толщин покрытия).

В данной интерпретации корреляционная матрица R характеризует отличие частотной зависимости коэффициента ослабления $\alpha_3(f_k, \xi)$ от линейного закона при воздействии шума и изменении ширины полосы частот измерений.

В таблице приведена матрица нормированных корреляционных коэффициентов для покрытия «RO3010–полиметилметакрилат» при ширине полосы частот измерений $\Delta f=1$ ГГц (диапазон измерения 9–10 ГГц, шаг по частоте 0,1 ГГц) и $\Delta f=2$ ГГц (диапазон измерения 9–11 ГГц, шаг по частоте 0,2 ГГц) при уровне СКО шума $\sigma=0,002$. Увеличение ширины Δf полосы частот измерений приводит к увеличению абсолютных значений корреляционных коэффициентов и, соответственно, уменьшению погрешности оценок ЭФГП отдельных слоёв диэлектрического покрытия.

Заключение. Разработанная имитационная модель позволяет оценивать точность реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн. В модели учитываются значения ЭФГП покрытия, уровень шума в измерительных данных и ширина полосы частот измерений. Имитационное моделирование и экспериментальные исследования ЭФГП одно- и двухслойных диэлектрических покрытий показали следующее. Для однослойных, двухслойных и в общем случае многослойных покрытий точность оценок ЭФГП их слоёв уменьшается с уменьшением их диэлектрической проницаемости и электрической толщины. Для многослойных покрытий увеличение числа оцениваемых ЭФГП приводит к увеличению погрешностей их оценки. Для однослойных и двухслойных диэлектрических покрытий при ширине полосы частот измерений 1 ГГц, относительная погрешность оценки

ЭФГП слоёв составляет не более 10 % с доверительной вероятностью 0,95 при СКО уровня шума $\sigma = 0,003 - 0,004$. При этом экспериментальное значение СКО уровня шума для реального измерительного комплекса $\sigma = 0,0015 \dots 0,0020$. Для повышения точности оценок ЭФГП диэлектрического покрытия необходимо либо проводить измерения в более широкой полосе частот, либо повышать точность измерения коэффициентов ослабления (уменьшая шум в измерительных данных). В отличие от методов с информативным параметром – комплексным коэффициентом отражения, предложенный метод позволяет проводить измерения в более узкой полосе частот, что позволяет учесть частотную дисперсию диэлектрической проницаемости и повысить достоверность измерений.

Список литературы

1. Ахметшин А. М., Славин В. И., Тихий В. Г., Платонов Е. Д. Идентификация слоистых диэлектрических структур методом параметрической оптимизации в многочастотной СВЧ интроскопии // Дефектоскопия. 1983. № 12. С. 57–65.
2. Андреев М. В., Борулько В. Ф., Дробахин О. О. Применение концепции квазирешения для определения параметров слоистых диэлектрических структур по данным измерений характеристик отражения на многих частотах. Ч. I // Дефектоскопия. 1995. № 12. С. 41–50.
3. Борулько В. Ф., Дробахин О. О., Славин И. В. Многочастотные СВЧ неразрушающие методы измерения параметров слоистых диэлектриков. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1982. 120 с.
4. Mohamed Abou-Khousa, Zoughi R., *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2007, vol. 56, no. 4, pp. 1107–1113. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
5. Mikhnev V. A., Nyfors E., Vainkainen P., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, vol. 45, no. 9, pp. 1405–1410. <https://doi.org/10.1109/8.623130>
6. Казьмин А. И., Федюнин П. А. Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны // Измерительная техника. 2019. № 9. С. 39–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45>
7. Пат. № 2594761 РФ / А. И. Казьмин, В. А. Манин, П. А. Федюнин, Д. П. Федюнин // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 23.
8. Федюнин П. А., Казьмин А. И., Манин В. А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 32–39. <https://doi.org/10.14489/td.2017.11.pp.032-039>
9. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.
10. Карпов И. Г. Аппроксимация экспериментальных распределений радиолокационных сигналов с использованием модернизированных распределений Пирсона // Радиотехника. № 5. 2003. С. 56–61.
11. Ищук И. Н., Карпов И. Г., Фесенко А. И. Обнаружение скрытых подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне

длин волн на основе идентификации их тепловых свойств // Измерительная техника. 2009. № 4. С. 36–39.

12. Guido Valerio, David R. Jackson, Alessandro Galli, *Proceedings of the Royal Society*, 2010, vol. 466, pp. 2447–2469. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
13. Andreas Patrovsky, Ke Wu, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2013, no. 1 (3), pp. 87–93. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2013.010305>
14. Zhuozhu Chen, Zhongxiang Shen, *Applied Sciences*, 2018, no. 8 (1), p. 102. <https://doi.org/10.3390/app8010102>
15. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

References

1. Akhmetshin A. M., Slavin V. I., Tikhii V. G., Platonov E. D., *Defektoskopiya*, 1983, no. 12, pp. 57–65 (in Russian).
2. Andreev M. V., Borul'ko V. F., Drobakhin O. O., *Defektoskopiya*, 1995, no. 12, pp. 41–50 (in Russian).
3. Borul'ko V. F., Drobakhin O. O., Slavin I. V. *Mnogochastotnye SVCh nerazrushayushchie metody izmereniya parametrov sloistykh dielektrikov*, Dnepropetrovsk, Izdatelstvo DGU Publ., 1982, 120 p. (in Russian).
4. Mohamed Abou-Khousa, Zoughi R., *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2007, vol. 56, no. 4, pp. 1107–1113. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
5. Mikhnev V. A., Nyfors E., Vainkainen P., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, vol. 45, no. 9, pp. 1405–1410. <https://doi.org/10.1109/8.623130>
6. Kaz'min A. I., Fedyunin P. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, pp. 809–816. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01699-7>
7. Kaz'min A. I., Manin V. A., Fedyunin P. A., Fedyunin D. P., RF Patent no. 259476, *Bull. Izobret.*, no. 23 (2016).
8. Fedyunin P. A., Kaz'min A. I., Manin V. A., *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 11, pp. 32–39 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/td.2017.11.pp.032-039>
9. Grinev A. Yu., Temchenko V. S., Bagno D. V. *Radary podpoverhnostnogo zondirovaniya. Monitoring i diagnostika sred i ob'ektov*, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 391 p. (in Russian).
10. Karpov I. G., *Radiotekhnika*, 2003, no. 5, pp. 56–61 (in Russian).
11. Ischuk I. N., Karpov I. G., Fesenko A. I., *Measurement Techniques*, 2009, vol. 52, pp. 388–393. <https://doi.org/10.1007/s11018-009-9282-7>
12. Guido Valerio, David R. Jackson, Alessandro Galli, *Proceedings of the Royal Society*, 2010, vol. 466, pp. 2447–2469. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0664>
13. Andreas Patrovsky, Ke Wu, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2013, no. 1 (3), pp. 87–93. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2013.010305>
14. Zhuozhu Chen, Zhongxiang Shen, *Applied Sciences*, 2018, no. 8 (1), p. 102. <https://doi.org/10.3390/app8010102>
15. Brekhovskikh L. M., *Volny v sloistykh sredakh*, Moscow, Nauka Publ., 1973, 343 p. (in Russian).

Дата поступления: 26.02.2020.

Дата принятия: 13.03.2020.

Evaluation of the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings by the multi-frequency radio wave method of a slow surface electromagnetic waves

Aleksandr I. Kaz'min, Pavel A. Fedjunin

Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy",
Voronezh, Russian Federation, e-mail: alek-kazmin@yandex.ru, fpa1@yandex.ru

One of the most important diagnostic problems multilayer dielectric materials and coatings is the development of methods for quantitative interpretation of the checkout results their electrophysical and geometric parameters. The results of a study of the potential informativeness of the multi-frequency radio wave method of surface electromagnetic waves during reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings are presented. The simulation model is presented that makes it possible to evaluate of the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric coatings. The model takes into account the values of the electrophysical and geometric parameters of the coating, the noise level in the measurement data and the measurement bandwidth. The results of simulation and experimental investigations of reconstruction of the structure of relative permittivities and thicknesses of single-layer and double-layer dielectric coatings with different thicknesses, with different values of the standard deviation (RMS) of the noise level in the measured attenuation coefficients of the surface slow electromagnetic wave are presented. Coatings based on the following materials were investigated: polymethyl methacrylate, F-4D PTFE, RO3010. The accuracy of reconstruction of the electrophysical parameters of the layers decreases with an increase in the number of evaluated parameters and an increase in the noise level. The accuracy of the estimates of the electrophysical parameters of the layers also decreases with a decrease in their relative permittivity and thickness. The results of experimental studies confirm the adequacy of the developed simulation model. The presented model allows for a specific measuring complex that implements the multi-frequency radio wave method of surface electromagnetic waves, to quantify the potential possibilities for the accuracy of reconstruction of the electrophysical and geometric parameters of multilayer dielectric materials and coatings. Experimental investigations and simulation results of a multilayer dielectric coating demonstrated the theoretical capabilities gained relative error permittivity and thickness of the individual layers with relative error not greater than 10 %, with a measurement bandwidth of 1 GHz and RMS of noise level 0,003–0,004.

Key words: multilayer dielectric coating, radio wave method, simulation model, inverse problem, permittivity, attenuation coefficient of field, slow surface electromagnetic wave.