

Имитационная модель оценки точности измерений электрофизических параметров многослойных диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн

А. И. Казьмин, email: alek-kazmin@yandex.ru

П. А. Федюнин, email: fpal@yandex.ru

В.А. Манин, email: fanni.05@mail.ru

П.Ю. Корепанов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
(г. Воронеж)

***Аннотация.** Представлена имитационная модель измерений, реализованная на основе системы электродинамического моделирования CST Microwave studio и системы Matlab. Приведены результаты имитационного моделирования по оценке диэлектрической проницаемости и толщины однослойного диэлектрического покрытия на металлической подложке при различных значениях среднего квадратического отклонения уровня шума в измерительных данных.*

***Ключевые слова:** многослойное диэлектрическое покрытие, метод поверхностных электромагнитных волн, имитационная модель, электрофизические и геометрические параметры.*

Введение

Для более гибкой оценки потенциальных возможностей методов и способов контроля электрофизических и геометрических параметров (ЭФГП) многослойных диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов и покрытий (МДММП), основанных на их оценке по характеристикам и параметрам поля поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ) путем решения нелинейных уравнений методами параметрической оптимизации, разработана имитационная модель реальной измерительно-вычислительной системы (ИВС) [1].

В обобщенном виде методы и способы контроля ЭФГП многослойных диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов и покрытий ПЭМВ сводятся к следующей последовательности действий [2,3]:

1. Измерение экспериментальной частотной зависимости действительной части комплексного коэффициента ослабления (КО)

поля ПЭМВ
$$A_{\omega} = [\alpha'_{\omega 1} f_1, \xi_1 \dots, \alpha'_{\omega K} f_K, \xi_1]^T, \quad \text{где}$$

$\xi_1 = \dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, t_n, \dots, t_N$ – вектор, подлежащих оценке ЭФГП, $\dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N$ – комплексные диэлектрические проницаемости, $\dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N$ – комплексные магнитные проницаемости, t_n, \dots, t_N – толщины МДММП, методом зонда.

2. Составление дисперсионного уравнения для ПЭМВ в многослойном РППМ с учетом количества слоев N.

3. Оценка вектора ЭФГП $\xi_1 = \dot{\varepsilon}_n, \dots, \dot{\varepsilon}_N, \dot{\mu}_n, \dots, \dot{\mu}_N, t_n, \dots, t_N$ исследуемого многослойного МДММП осуществляется путем минимизации квадратичного функционала (целевой функции), построенной, как невязка между вектор-столбцом экспериментальных $A_э$ и вектор-столбцом вычисленных теоретических значений $A_т$ комплексных КО ПЭМВ путем решения дисперсионного уравнения, на наборе частот $f_k, k = 1, 2, \dots, K$, в заданной полосе частот $\Delta f = f_k - f_1$:

$$\xi_1 = \arg \min_{\xi_1 \in \xi_{min}} \left(\frac{1}{K} |A_э - A_т|^2 + \varpi \left(\sum_{n=1}^N q_n^{\dot{\varepsilon}} \|\dot{\varepsilon}_n - \dot{\varepsilon}_{n0}\|^2 + \sum_{n=1}^N q_n^{\dot{\mu}} \|\dot{\mu}_n - \dot{\mu}_{n0}\|^2 + \sum_{n=1}^N q_n^t \|t_n - t_{n0}\|^2 \right) \right), \quad (1)$$

где $A_э$ и $A_т$ – вектор-столбцы, со следующими компонентами:

$$A_э = [\alpha'_э, f_1 - j\alpha''э, f_1 \cdot \varphi\alpha, \dots, \alpha'_э, f_K - j\alpha''э, f_K \cdot \varphi\alpha]^T; \quad (2)$$

$$A_т = [\alpha'_т, f_1, \xi_1, \dots, \alpha'_т, f_K, \xi_1]^T;$$

где $q_n^{\dot{\varepsilon}}, q_n^{\dot{\mu}}, q_n^t$ – веса, определяющие степень априорной информации о комплексных диэлектрических проницаемостях, комплексных магнитных проницаемостях и толщинах слоев МДММП; $\dot{\varepsilon}_n, \dot{\mu}_n, t_n$ – комплексные диэлектрические проницаемости, комплексные магнитные проницаемости и толщины слоев МДММП; $\dot{\varepsilon}_{n0}, \dot{\mu}_{n0}, t_{n0}$ – найденные с учётом априорной информации о составляющей среднее значение n-й составляющей вектора ЭФГП из области допустимых значений $\dot{\varepsilon}_{n0} \in \dot{\varepsilon}_{nmin}, \dots, \dot{\varepsilon}_{nmax}$, $\dot{\mu}_{n0} \in \dot{\mu}_{nmin}, \dots, \dot{\mu}_{nmax}$, $t_{n0} \in t_{nmin}, \dots, t_{nmax}$; ϖ – параметр регуляризации.

2. Имитационная модель оценки точности измерений

Такие элементы ИВС, как антенна возбуждения поверхностных электромагнитных волн АВ, приёмная антенна (измерительный зонд)

ПА, а также исследуемое покрытие на металлической подложке ИП, реализованы в блоке формирования коэффициентов ослабления БФКО ЭД в виде модели в системе электродинамического моделирования CST Microwave studio (Simulia corporation). Геометрические размеры данных элементов точно соответствуют их размерам в реальном измерительном комплексе. Для оценки адекватности разработанной модели проведено сравнение модельных КО поля ПЭМВ стандартного образца полиметилметакрилата $\epsilon \approx 2,7 - j0,081$ размером 200×100 мм и толщиной 1 мм $\alpha'_{CST}(f_k, \xi'_1)$ с теоретическими коэффициентами ослабления $\alpha'_T(f_k, \xi'_1)$ найденными при решении дисперсионного уравнения [2,3], а также с экспериментальными КО $\alpha'_o(f_k, \xi'_1)$ измеренными на реальном измерительном комплексе. Структурная схема имитационной модели приведена на рис.1.

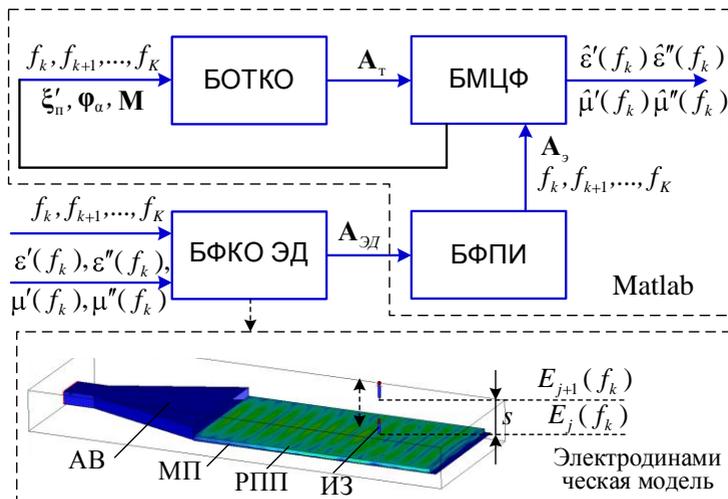


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели

Отличие модельных КО от теоретических составляет не более 0,08 %. Относительные погрешности оценки диэлектрической проницаемости и толщины полиметилметакрилата, полученные путём решения обратной задачи (1) по частотной зависимости $\alpha'_{CST}(f_k, \xi'_1)$ составляют не более 0,05 %. Таким образом, разработанная в CST

Microwave studio модель обеспечивает получение КО ПЭМВ с минимальной методической погрешностью, т.е. КО практически соответствуют теоретическим значениям $\alpha'_T(f_k, \xi'_1)$. Кроме того, при решении обратной задачи (1) оценки ЭФГП получены с минимальными погрешностями.

Отличие экспериментальных КО $\alpha'_o(f_k, \xi'_1)$ от модельных значений составляет не более 6% и обусловлено влиянием шумов (инструментальные погрешности измерительного комплекса и другие погрешности, связанные с процессом эксперимента). Экспериментальные относительные погрешности оценки действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_n, \varepsilon''_n$, а также толщины t_n составляют не более 7 и 5% соответственно. Экспериментальные значения КО в имитационной модели формировали в блоке формирования погрешностей измерений коэффициентов ослабления БФПИ в виде суммы значений модельных КО $\alpha'_{CST}(f_k, \xi'_1)$ и функции, имитирующей влияние шума. На точность определения КО ПЭМВ влияет множество случайных факторов. Поэтому погрешность оценки указанных коэффициентов моделировалась аддитивным некоррелированным гауссовым шумом с нулевым математическим ожиданием $m[n f_k] = 0$ и заданным уровнем дисперсии σ_k^2 . Экспериментальная проверка на реальной ИВС показала, что среднее квадратическое отклонение (СКО) уровня шума при измерениях ЭФГП стандартного образца полиметилметакрилата, составляет 0,0015–0,0020 и подчиняется нормальному закону распределения.

Таким образом, экспериментальные значения КО ПЭМВ $\alpha'_o(f_k, \xi'_1)$ при задействовании при моделировании блока БФКО ЭД, в блоке БФПИ формировали на основе выражения:

$$\alpha'_o(f_k, \xi'_1) = \alpha'_{CST}(f_k, \xi'_1) + n(f_k), \quad k = 1, \dots, K \quad (3)$$

где $n(f_k)$ – шум, воздействующий на k-измерение и обусловленный инструментальными погрешностями ИВС и другими погрешностями при проведении эксперимента.

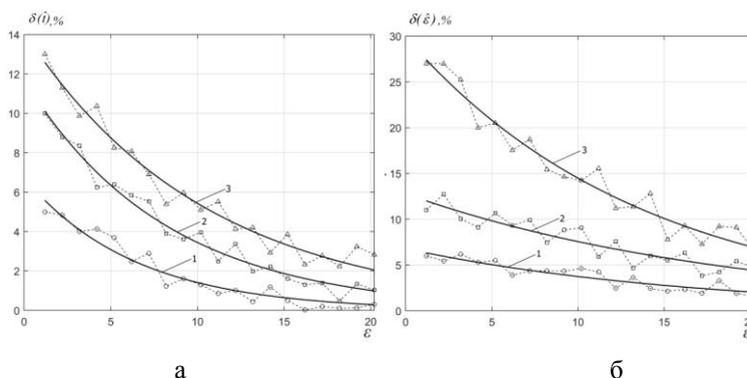
При имитационном моделировании без использования блока БФКО ЭД экспериментальные значения $\alpha'_o(f_k, \xi'_1)$ формировали на основе выражения (3).

Блок определения теоретических значений комплексных коэффициентов ослабления БОТКО реализует решение дисперсионного

уравнения, а блок минимизации целевой функции БМЦФ реализует операцию по решению обратной задачи, путём варьирования составляющими вектора ξ_1 . Данные блоки реализованы в системе Matlab. При этом решение обратной задачи в блоке БМЦФ осуществляется с помощью генетического алгоритма, реализованного в виде функции «ga» приложения Global Search пакета Matlab.

3. Моделирование измерения ЭФГП многослойных диэлектрических покрытий с помощью имитационной модели

На рис. 2а представлены зависимости средней относительной погрешности оценки диэлектрической проницаемости $\delta(\varepsilon)$ однослойного покрытия с толщиной $b = 1$ мм при увеличении значений диэлектрической проницаемости слоя от 1,2 до 20, для трех значений СКО уровня шума: 0,001; 0,003; 0,005 [3]. На рисунке 2б представлено, как при этом меняется погрешность оценки толщины слоя $\delta(i)$. Коэффициент ослабления поля ПЭМВ определяли в диапазоне частот 9–10 ГГц с шагом по частоте 0,1 ГГц (количество частот $N=10$) [3].



а – оценка толщины $\delta(i)$; б – диэлектрической проницаемости $\delta(\varepsilon)$

Рис. 2. Зависимости средней относительной погрешности оценки ЭФГП покрытия при фиксированных значениях СКО уровня шума (1 – $\sigma = 0,001$; 2 – $\sigma = 0,003$; 3 – $\sigma = 0,005$)

Анализ зависимостей рис. 2а для однослойного покрытия показывает, что относительная погрешность $\delta(\varepsilon)$ оценки диэлектрической проницаемости слоя, при фиксированном значении уровня СКО шума и толщине слоя, уменьшается с возрастанием их

величины. Относительная погрешность оценки толщины слоя $\delta(i)$, также уменьшается. При этом, точность оценки толщины слоя в 2–2,5 раза выше точности оценки диэлектрической проницаемости.

По результатам имитационного моделирования, метод дает оценки диэлектрической проницаемости и толщины для однослойного покрытия при СКО уровня шума $\sigma = 0,003$, во всем диапазоне исследуемых значений диэлектрической проницаемости (1,2–20) с погрешностью не больше 10% с доверительной вероятностью 0,95 [3].

Заключение

Таким образом, разработана имитационная модель, позволяющая оценивать точность измeрeния электрофизических и геометрических параметров многослойных МДММП в зависимости от их электрофизических и геометрических параметров, учитывающая значение СКО уровня шума в измерительных данных и ширину полосы частот измерений.

Список литературы

2. Михайлин, Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.

3. Казьмин, А.И. Методологические принципы определения электрофизических параметров материалов и покрытий со сложной внутренней структурой с помощью поверхностных электромагнитных волн / А.И. Казьмин // Дефектоскопия. – 2022. – № 3. – С. 34–49.

4. Казьмин, А.И. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым методом поверхностных медленных электромагнитных волн / А.И. Казьмин, П.А. Федонин // Измерительная техника. – 2020. – 8. С. – 51–58.