

УДК 543.61: 621.372.88

**Стенд для исследования электрофизических параметров
радиопоглощающих материалов и покрытий применяемых для
снижения радиолокационной заметности авиационных комплексов**

Казьмин А.И.* , Манин В.А., Федюнин П.А. , Ивануткин А.Г.*****

*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, ул.
Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

**e-mail: alek-kazmin@ya.ru*

***e-mail: fpa1@yandex.ru*

****e-mail: mazurova83@mail.ru*

Аннотация

В статье проведен анализ процесса оптимизации эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) авиационного комплекса (АК), при снижении его радиолокационной заметности с помощью радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП). При этом установлено, что одним из самых важных этапов оптимизации ЭПР является оценка электрофизических параметров (ЭФП) РПМ и РПП в ходе натурного эксперимента.

Разработан лабораторный стенд для измерения ЭФП РПП АК. Стенд является технической реализацией метода контроля параметров РПМ и РПП, использующего явление «разлития» поверхностной электромагнитной волны по плоскости и быстрого сканирования результатов взаимодействия поля со слоем покрытия в функциях комплекса электрофизических и геометрических параметров. Лабора-

торный стенд обеспечивает повышение точности и достоверности определения ЭФП РПМ и РПП и вероятностей обнаружения дефектов в них.

Ключевые слова

радиопоглощающий материал, радиопоглощающее покрытие, измерение, электрофизические параметры, эффективная поверхность рассеяния, лабораторный стенд.

Введение

Снижение радиолокационной заметности (РЛЗ) в настоящее время рассматривается как один из действенных путей повышения живучести и боевой эффективности вооружения и военной техники в целом и образцов авиационных комплексов (АК) в частности. Поэтому при модернизации существующей и создании новых образцов АК у нас в стране и за рубежом данному вопросу уделяется значительное внимание [1,2].

Одним из распространенных и эффективных способов снижения РЛЗ АК является применение радиопоглощающих покрытий (РПП) на их наиболее отражающих элементах [1,2]. На АК одновременно могут применяться десятки различных РПП. Покрытия отличаются по своим радиофизическим и механическим свойствам, они наносятся определенным образом на конкретных элементах в зависимости от вида объекта и предполагаемых условий его использования и наблюдения. При оптимальном выборе РПП и мест их нанесения можно уменьшить величину эффективной поверхности рассеяния образцов АК на порядок и более.

Экспериментальные исследования свойств РПП в решении проблемы снижения РЛЗ АК занимают исключительное положение. Зарубежный и отечественный

опыт свидетельствует, что без наличия развитой лабораторно-полигонной базы достичь существенных результатов по этой проблеме невозможно. Одной из основных задач экспериментальных исследований в рамках проблемы снижения РЛЗ является исследование ЭФП РПП таких как, комплексные диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости, волновое сопротивление Z_v и толщина покрытия – b . Кроме того, в процессе эксплуатации АК возникают задачи высокоточной дефектоскопии РПП [1,2,6].

Методика процесса оптимизации ЭПР АК при снижении его радиолокационной заметности с помощью РПП [7] приведена на рисунке 1.

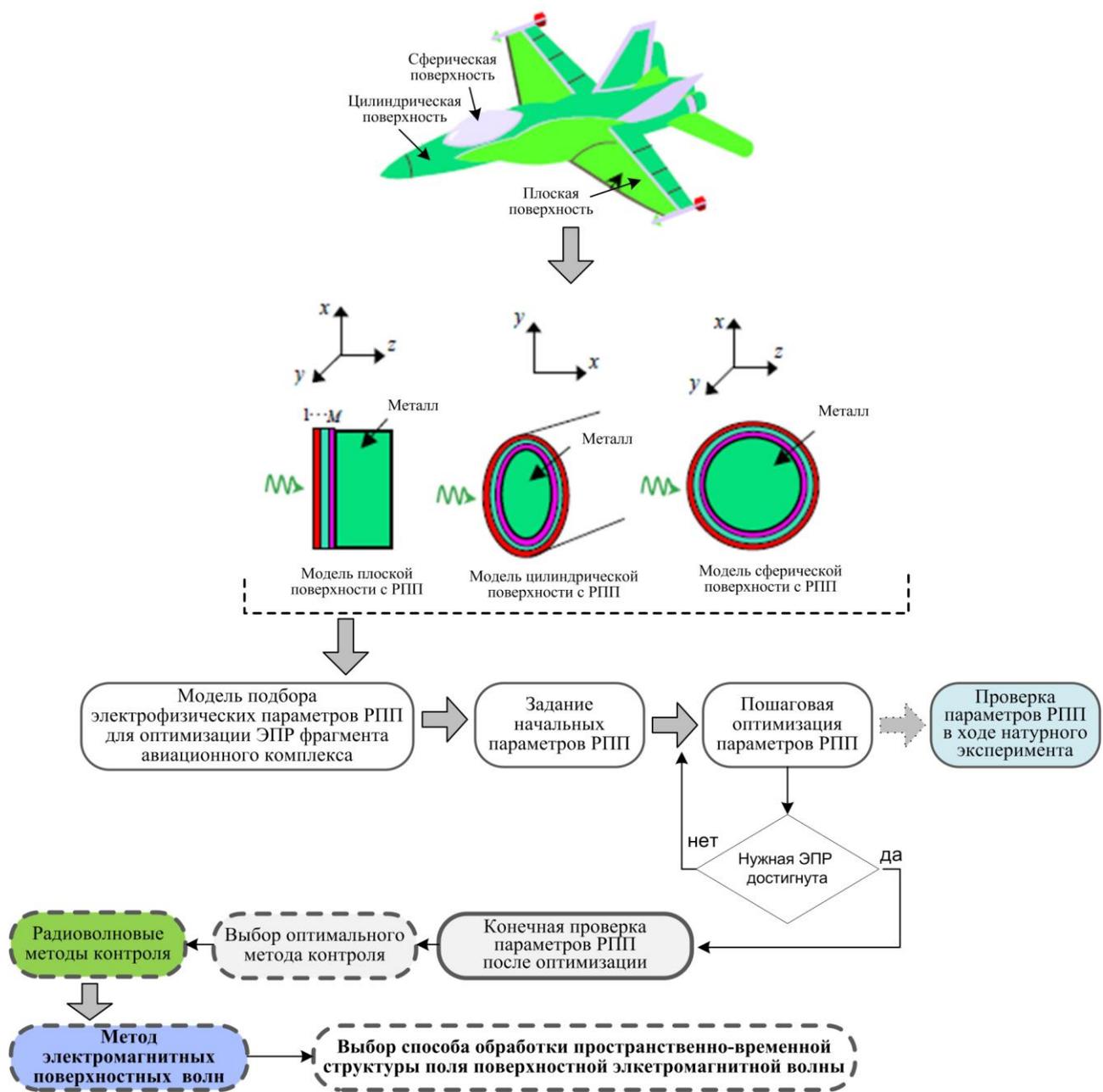


Рис. 1. Методика оптимизации ЭПР авиационного комплекса при снижении его радиолокационной заметности с помощью РППМ и РПП

Как видно из приведенной схемы оценка электрофизических параметров РПП в ходе натурального эксперимента при этом выступает как одна из основных частей такой оптимизации, поскольку позволяет проконтролировать параметры РПП полученные расчетным путем.

Вместе с тем, существующие способы контроля не обеспечивают точное определение ЭФП и надежное обнаружение дефектов РПП. Практически все информативные способы реализованы по принципу «на прохождение» электромагнитных волн через материал и не обеспечивают возможность измерения и контроля требуемого состава параметров РПП, нанесенных на металлические поверхности.

Изложенное выше и определяет актуальность проведения исследований и разработок новых и повышение эффективности известных бесконтактных методов и устройств для измерения ЭФП и дефектоскопии широкого класса диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов и покрытий АК.

Постановка задачи

Наиболее эффективно задача исследования свойств РПП АК может быть решена при использовании лабораторных стендов, реализованных в виде измерительно-вычислительных систем (ИВС), учитывающих индивидуальные характеристики РПП. Далее в статье речь будет идти именно об ИВС.

Под ИВС понимаются системы, предназначенные для получения количественной информации непосредственно от объекта контроля, путем измерения и контроля, обработки этой информации и выдачи ее в виде совокупности чисел, высказываний, графиков, отражающих состояние данного объекта [1].

Из анализа рисунка 1 можно сделать вывод, что при проектировании АК с РПП, требуется довольно оперативно проводить измерения ЭФП РПП. Желательно, чтобы ИВС позволяла производить измерение ЭФП РПП в реальном масштабе времени с визуализацией результатов эксперимента в виде трехмерных графиков на экране персонального компьютера, позволяла бы производить статистическую обра-

ботку результатов измерений, сохраняла результаты измерений для создания базы данных ЭФП РПП, осуществляла диагностику работоспособности отдельных функциональных блоков и всей измерительной системы (ИС) в целом.

Таким образом, для эффективного измерения ЭФП РПП и обнаружения в них дефектов, требуется разработать ИВС удовлетворяющую вышеприведенным требованиям, для чего необходимо разработать следующие ее основные компоненты [3,4,5]:

- ИС – как совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов измерительной системы);

- математическое обеспечение (МО);

- программное обеспечение (ПО).

1 Математическое обеспечение

Составляющие разработанной ИВС для исследования электрофизических параметров РПМ и РПП, применяемых для снижения радиолокационной заметности АК приведены на рисунке 2.

Математическое обеспечение ИВС приведено на уровне метода определения ЭФП и алгоритмов обнаружения и оценки дефектов РПП.

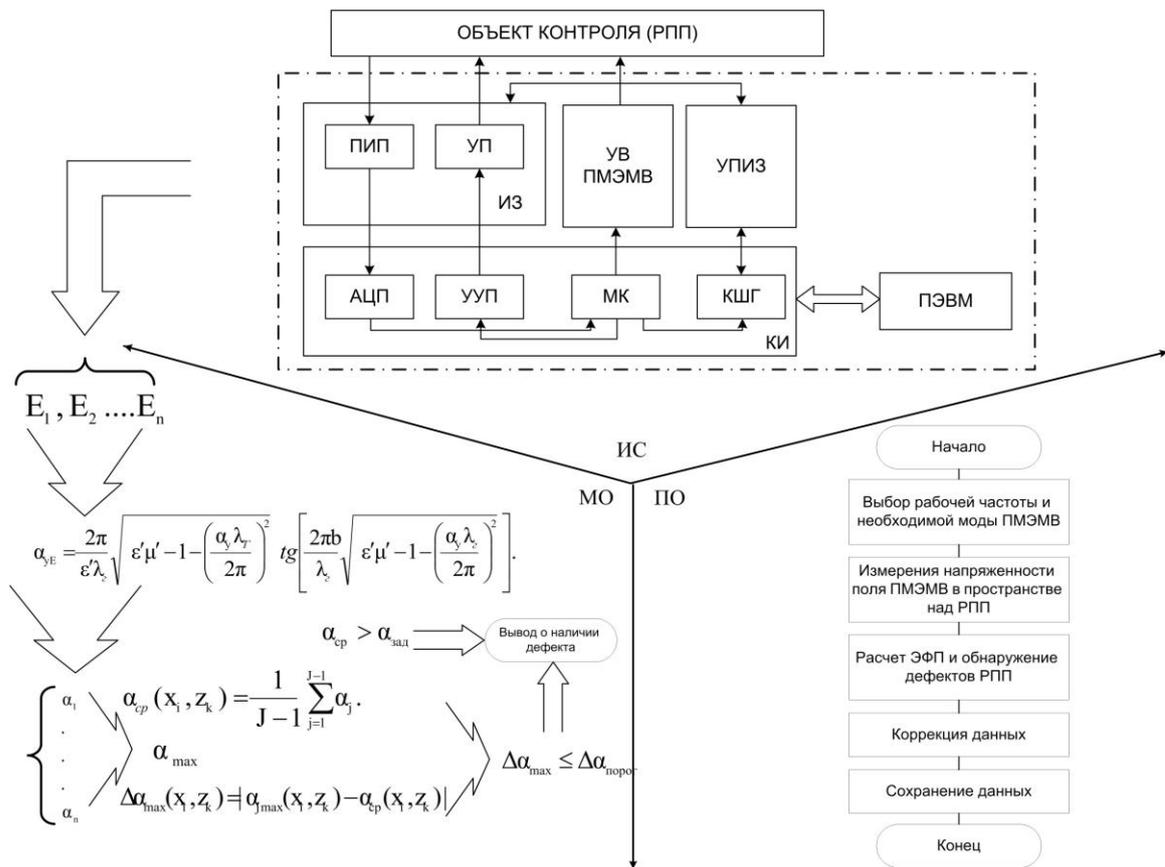


Рис. 2 – Составляющие ИВС

Разработанный радиоволновой метод контроля параметров покрытий использует явление «разлития» поверхностной электромагнитной волны (ЭМВ) по плоскости и быстродействующего сканирования результатов взаимодействия поля со слоем покрытия в функциях комплекса электрофизических и геометрических параметров [1]. Установлено, что коэффициент ослабления поля поверхностной ЭМВ α_y функционально зависит от измеряемых параметров слоя РПП ϵ' , μ' , b и длины волн генератора λ_r , т. е. величина ослабления поля $\alpha_y = f(\epsilon', \mu', b, \lambda_r)$ является их мерой [1, 6, 8]. Аналитически функция коэффициента ослабления имеет для ЭМВ E1 вид:

$$\alpha_y^{E1} = \frac{2\pi}{\lambda_{r1}\epsilon'} \sqrt{\epsilon'\mu' - 1 - \left(\frac{\alpha_y^{E1}\lambda_{r1}}{2\pi}\right)^2} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda_{r1}\epsilon'} \sqrt{\epsilon'\mu' - 1 - \left(\frac{\alpha_y^{E1}\lambda_{r1}}{2\pi}\right)^2} \right) \quad (1)$$

Реализация разработанного метода показана на рис. 3. и заключается в сканировании РПП электромагнитными поверхностными волнами E и H типов на трех частотах при внешнем поле подмагничивания и в его отсутствии, а определение электрофизических параметров РПП производится на основе решения системы уравнений вида (1), устанавливающих связь между экспериментально измеряемыми коэффициентами ослабления поля и искомыми параметрами РПП.

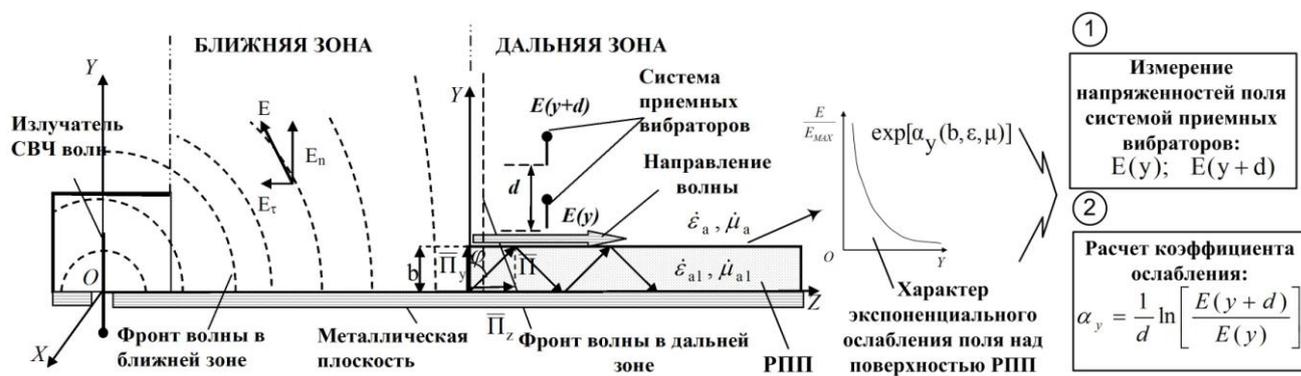


Рис. 3 – Реализация метода поверхностных электромагнитных волн

Разработанный метод позволяет измерять ЭФП РПП. Для возможности использования его для обнаружения и оценки дефектов РПП разработана система алгоритмов обнаружения, оценки и визуализации электрофизических и геометрических неоднородностей и дефектов РПП по результатам оценки деформации пространственно-временной структуры поля поверхностной ЭВМ, взаимодействующей со слоем РПП.

Рассмотрим алгоритмы выявления и оценке дефектов в РПП более подробно [1,6].

Алгоритм 1. Алгоритм определения и оценки дефектов РПП по «информативному» объёму.

Сущность данного алгоритма заключается в обнаружении и оценки дефектов покрытия (электрофизического или физического характера) по оценке деформации

электромагнитного поля поверхностной медленной волны, распространяющейся в слое покрытия, в нормальной относительно её распространения плоскости. Мерой параметров дефектов покрытия является отклонение распределения напряжённости поля в зоне дифракции ЭМВ от экспоненциального закона или, что то же самое, непостоянство коэффициента нормального ослабления поля α_y . Оценка дефекта производится по отношению «информативного» объёма к площади РПП, для которой характерно отклонение коэффициента нормального ослабления от заданного порогового значения. Данный алгоритм подробно рассмотрен нами в [1, 6].

Алгоритм 2. Микроволновой интроскопии поверхностной медленной волной.

Основу алгоритма микроволновой интроскопии [1, 6] составляет первый алгоритм [1, 6]. Отличие состоит в том, что в каждой точке сканируемой поверхности по значениям коэффициентов нормального ослабления поля поверхностной медленной волны α_y определяют математическое ожидание m_{α_y} и дисперсию коэффициентов ослабления D_{α_y} как функцию геометрических и электрофизических параметров дефектов. По матрице значений дисперсии коэффициента ослабления поля по всей поверхности сканирования с помощью программ обработки полученных данных строят пространственное распределение дисперсии коэффициента нормального ослабления поля поверхностной медленной волны, картина которой визуально отображает форму и геометрические размеры дефектов.

В качестве примера на рис. 4 представлена экспериментальная зависимость дисперсии коэффициента нормального ослабления, как функции геометрических и

электрофизических параметров дефектов в координатах XYZ , полученная при сканировании поверхности магнитодиэлектрического РПП с различными неоднородными включениями (такими как простое отверстие диаметром 1,5 мм, ферритовый шарик диаметром 2 мм и ферритовый стержень диаметром 2 мм и длиной 1 см).

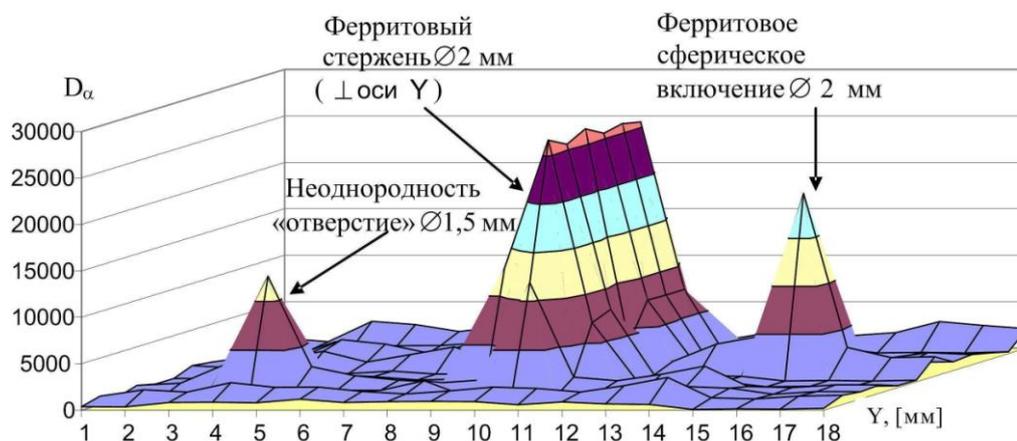


Рис. 4 – Экспериментальная зависимость дисперсии коэффициента нормального ослабления

Алгоритм 3. Обнаружения и оценки дефектов на основе многопараметрической обработки поля поверхностной ЭМВ

Основу алгоритма 3 составляет второй алгоритм [1, 6]. Отличие состоит в том, что алгоритм обеспечивает совместную обработку высокоинформативных результатов измерений. И он заключается в совместной статистической обработке результатов измерений коэффициентов ослабления α_y полей Е и Н типов на трех частотах $\lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}$, что приводит к увеличению контраста между значениями параметров поля в области с дефектами и в бездефектной области. Это, в свою очередь, повышает вероятность обнаружения дефектов и точность оценки относительных границ этих областей.

2 Измерительная система

В состав структурной схемы ИС, реализованной на базе персональной электронной вычислительной машины (ПЭВМ), входят (рисунок 2): измерительный зонд (ИЗ), включающий в себя первичный измерительный преобразователь (ПИП) и устройство подмагничивания (УП); устройство возбуждения поверхностной медленной ЭМВ (УВ ПМЭМВ); устройство перемещения измерительного зонда (УПИЗ); контроллер измерений (КИ), состоящий из аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), устройства подмагничивания (УП), микроконтроллера (МК) и контроллера шаговых двигателей (КШГ). КИ выполняет функции интерфейса связи ПЭВМ с измерительным зондом, УВ ПМЭМВ и УПИЗ [1].

Функциональная схема ИС приведена на рисунке 5 и включает в следующие основные элементы :

– ИЗ, представляющий собой систему вертикально и горизонтально ориентированных полуволновых вибраторов с устройством создания поля локального подмагничивания;

– УПИЗ представляющее собой роботизированную систему с числовым программным управлением и предназначенное для перемещения ИЗ в любую точку пространства над сканируемой областью РПП;

– УВ ПМЭМВ, состоящее из антенны возбуждения поверхностных волн, управляемого генератора СВЧ и предназначенное для возбуждения в слое РПП поверхностной медленной ЭМВ [1,9];

–АЦП предназначен для измерения силы тока в вертикально и горизонтально ориентированных приемных вибраторах, пропорциональной напряженности поля поверхностной медленной ЭМВ.



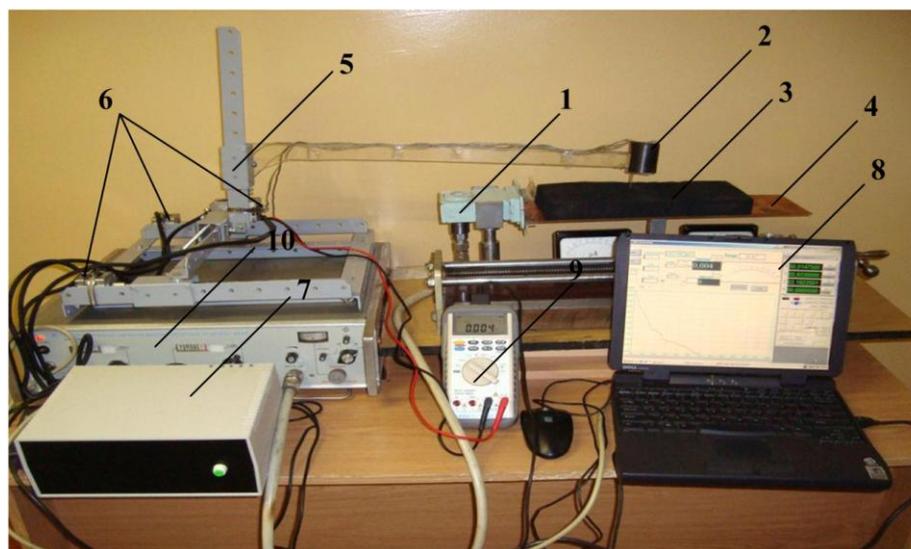
Рис. 5. Функциональная схема измерительной системы

Основу УПИЗ образует система, состоящая из «направляющих» по осям X, Y, Z, управляющей платы и трех шаговых двигателей фирмы Sanyo Denki. Платы УПИЗ принимают сигнал от ПЭВМ и указывают, в каком направлении и на какое расстояние должно выполняться движение по осям координат ИЗ за счет вращения шаговых двигателей. Управляющие платы спроектированы с использованием контроллеров шаговых двигателей L297 и L298 компании STMicroelectronics.

Устройство создания локального поля подмагничивания ИЗ представляет собой пустотелый цилиндр из ферромагнитного материала, на котором находится соленоид подмагничивания. Расположено устройство подмагничивания над вибраторными антеннами вблизи РПП.

В качестве АЦП задействован цифровой микроамперметр, с относительной погрешностью измерения силы тока $\delta=0.05\%$. Данные снимаются с ИЗ, подаются на АЦП цифрового микроамперметра и далее поступают в ПЭВМ в виде текстовых файлов для дальнейшей обработки.

Внешний вид разработанной ИВС представлен на рисунке 6.



1 антенна возбуждения поверхностных волн, 2 измерительный зонд, 3 исследуемое РПП, 4 металлическая подложка, 5 устройство перемещения измерительного зонда, 6 шаговые электродвигатели, 7 платы управления шаговыми двигателями и устройством подмагничивания, 8 ПЭВМ, 9 цифровой многоканальный амперметр, 10 генератор СВЧ

Рис. 6. Внешний вид экспериментальной ИВС для экспресс-контроля ЭФП и обнаружения дефектов РПП на металлическом основании

3 Программное обеспечение

В связи с ростом требований предъявляемых к ИС, усложнением и расширением решаемого ими класса задач, разработка программного обеспечения становится одним из главных направлений при проектировании ИВС.

В разработанной ИВС функцию ПО выполняет управляющая программа. Управляющая программа реализована в среде графического программирования LabVIEW 2011. Технологии National Instruments позволяют легко организовать ввод данных в ПЭВМ, а встроенные функции – довольно просто измерительный процесс.

Управляющая программа может работать в нескольких режимах. В качестве примера рассмотрим последовательность действий, выполняемых управляющей программой при реализации алгоритма 3 обнаружения и оценки дефектов РПП на основе многопараметрической обработки информативных полей поверхностных волн (рисунок 7). Остальные режимы, реализующие алгоритм 1, алгоритм 2 и метод измерения ЭФП подробно приведена в [1, 9].

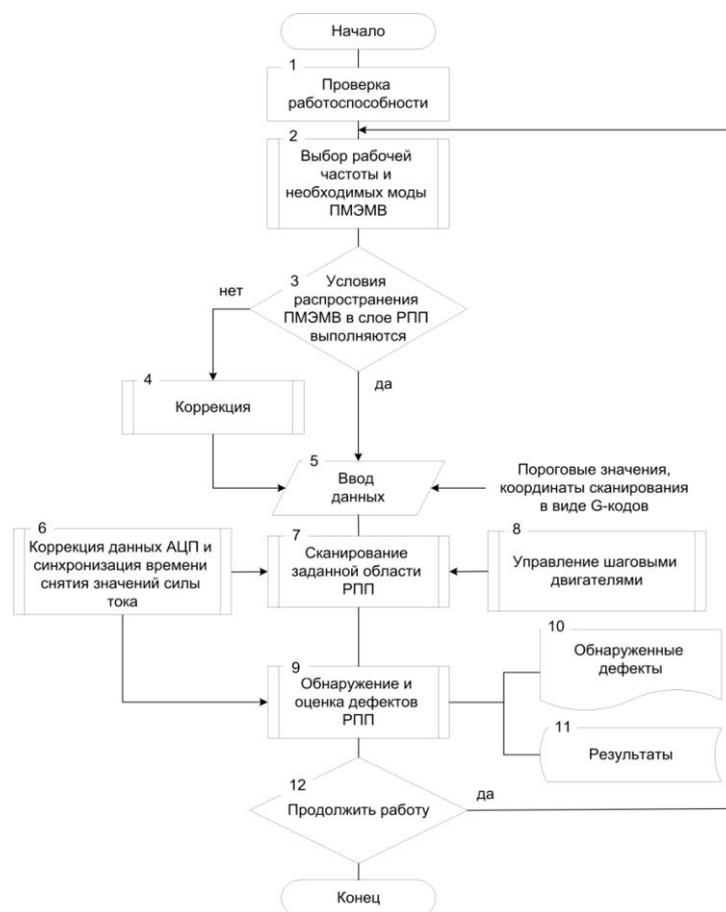


Рис. 7. Блок-схема алгоритма функционирования ИВС

Блок 1 – включение обмена данными между платой управления шаговыми двигателями и ПЭВМ, осуществление проверки работоспособности по соответствующему тесту. Производится включение ГСВЧ сигналом с ПЭВМ. Осуществляется проверка работоспособности устройства подмагничивания. Производится проверка

наличия информационного сигнала от ПИП с использованием каналов АЦП многоканального микроамперметра.

Блок 2 – подстройка рабочих частот и выбор необходимых мод поверхностной ЭМВ для обеспечения оптимальных условий распространения в слое РПП, минимальной погрешности определения ЭФП и задания необходимой точности локализации дефектов.

Блок 3 – проверка условий распространения мод поверхностной ЭМВ в слое РПП путем контроля информационного сигнала от ПИП, при наличии и отсутствии поля подмагничивания. Если условия распространения соблюдаются, происходит переход к блоку 5, если условия не выполняются, то происходит коррекция рабочих частот путем подачи управляющего сигнала с ПЭВМ на ГСВЧ (Блок 4).

Блок 5 – ввод исходных данных перед началом измерений порогового значения «отфоновой» дисперсии $\Delta D_{\text{порог}}$ и координаты сканирования РПП в виде G-кодов.

Блок 7 – последовательное сканирование поверхности РПП ИЗ при помощи УПИЗ в заданной области РПП, на каждой из трех рабочих длин волн генератора $\lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}$.

При работе блока 7 происходит подача управляющих сигналов с ПЭВМ на плату управления шаговыми двигателями, которая выдает необходимое напряжение для их нормального режима работы (Блок 8). При сканировании производится коррекция данных АЦП многоканального микроамперметра (Блок 6), синхронизация моментов снятия значений силы тока с ПИП (Блок 6) с временем прохода ИЗ точек

сканирования.

Блок 9 – Обнаружение и оценка дефектов в исследуемом РПП. Искомые ЭФП и выявленные дефекты отображаются на мониторе ПЭВМ (Блок 10) и сохраняются в текстовый файл результатов (Блок 11).

4 Экспериментальные исследования на разработанной ИВС

Экспериментальные исследования проводились в безэховой камере для исключения побочных мешающих радиоизлучений. Возбуждение поверхностных волн в слое РПП осуществлялось на длине волны генератора 2-3 см. Измерения проводились при температуре окружающей среды 22⁰ С. Контроль температуры осуществлялся инфракрасным пирометром фирмы Uni Trend Group UT303B [1].

Для экспериментальных исследований, были изготовлены модельные РПП:

РПП-М1 и РПП-М2

РПП-М1 представляет собой пористый материал, пропитанный мелкодисперсной сажей с оксидом цинка ZnO, модуль коэффициента отражения покрытия не менее -15 дБ.

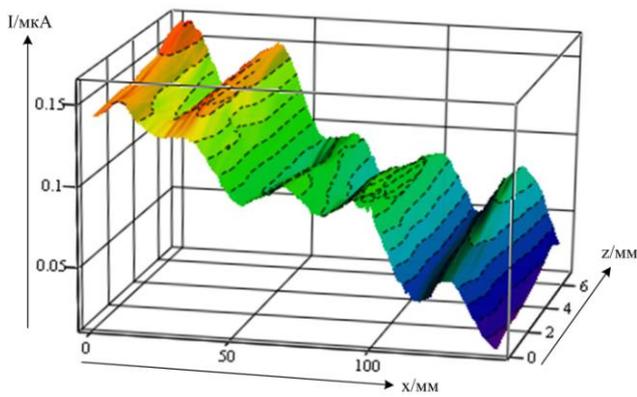
РПП-М2 это - пористый материал, пропитанный мелкодисперсной сажей и мелкодисперсным ферромагнитным порошком, модуль коэффициента отражения покрытия не менее -18 дБ.

Для экспериментального подтверждения наличия и характера поверхностных ЭМВ, возбуждаемых в слое РПП на металлическом основании проведены эксперименты по определению пространственно-временной структуры поля поверхностной волны в различных РПП. Измерялись напряженности электрического поля поверхностной волны в заданных координатах сканирования. При этом наводимый в при-

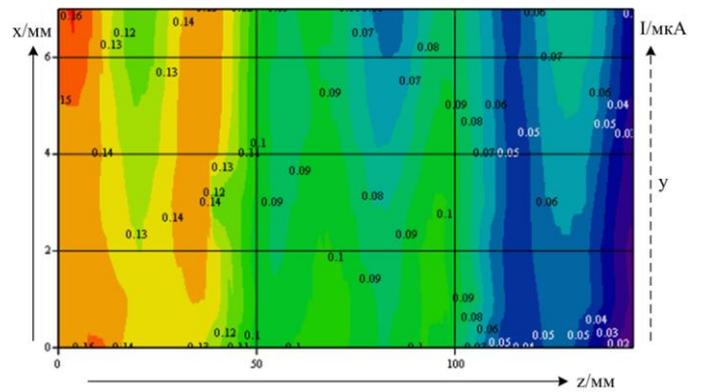
емном вибраторе ток прямо пропорционален напряженности электрического поля поверхностной ЭМВ. На рис. 8 а, в показаны измеренные трехмерные структуры, а на рисунке 8 б,г контурные графики напряженности электрического поля для различных РПП. При $x=0$ имеем максимум диаграммы направленности. На рисунках 8 а, б показана структура поля моды E_1 для РПП-М1 при $y_0=1$ мм, $f=3594$, на рисунке 8 в,г для РПП-М2 $y_0=1$ мм, $f=3448$ МГц, где y_0 – расстояние от вибратора до поверхности РПП.

Анализ графиков представленных на рисунке 8 показал, что структура поля над различными РПП имеет ярко выраженный волновой характер и представляет собой поверхностную медленную ЭМВ. В данном случае поле поверхностной ЭМВ это - сумма бегущей и стоячей волн. Последнее следует из ограниченности поверхности РПП и того, что у рассматриваемой системы (как разновидности длинной линии на границах) с окружающим пространством не совпадают волновые сопротивления длинной линии $Z_{дл}$ и окружающего воздуха $Z_0 \approx 377$ Ом.

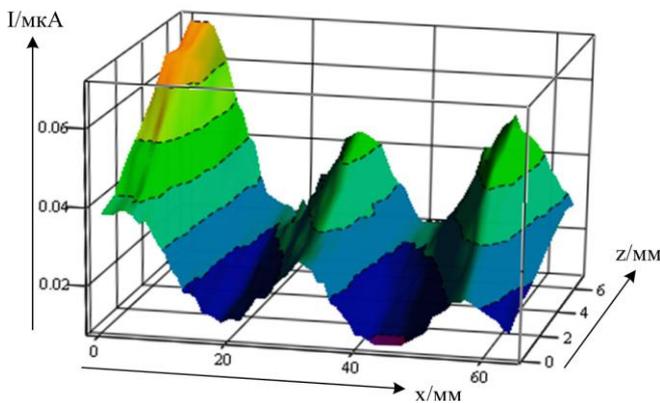
Для оценки вероятностей обнаружения дефектов в РПП разработанными алгоритмами в ходе натурного эксперимента в РПП-М1 внесены дефекты типа «отверстие» с различными диаметрами: «отверстие» диаметром 1 мм, «отверстие» диаметром 3 мм и «отверстие» диаметром 5мм.



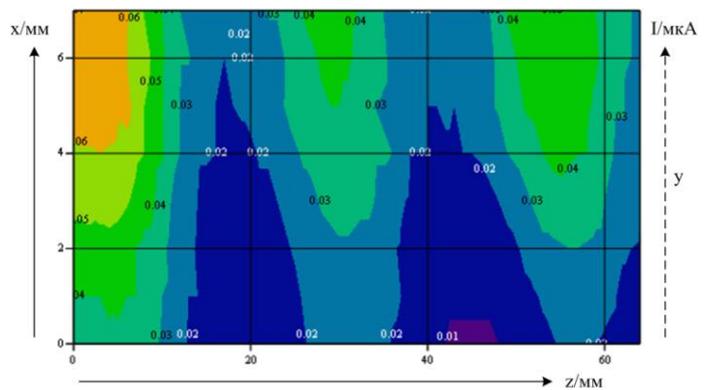
а) – РПП-М1 – $y_0=1$ мм, $f=3594$ МГц



б) – РПП-М1 – $y_0=1$ мм, $f=3594$ МГц



в) – РПП-М2 – $y_0=1$ мм, $f=3448$ МГц



г) – РПП-М2 – $y_0=1$ мм, $f=3448$ МГц

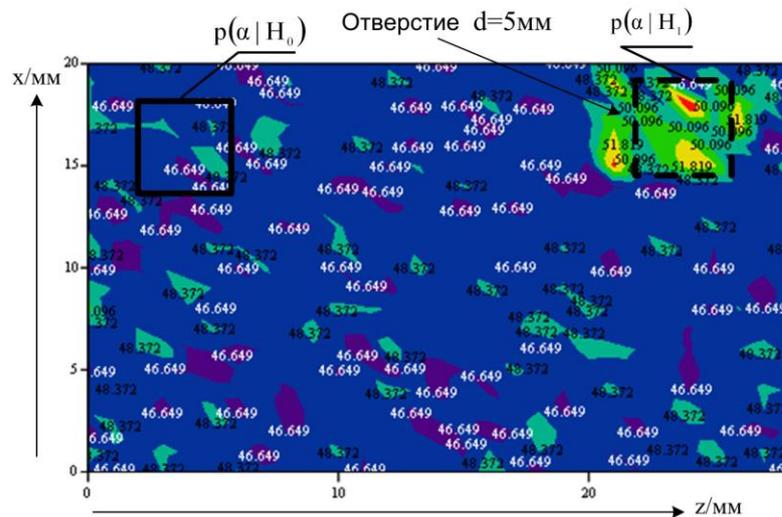
а), в) – трехмерные структуры поля; в), г) – двумерные проекции

Рис. 8. Экспериментальные структуры поля поверхностной волны (значения силы тока на выходе приемного вибратора)

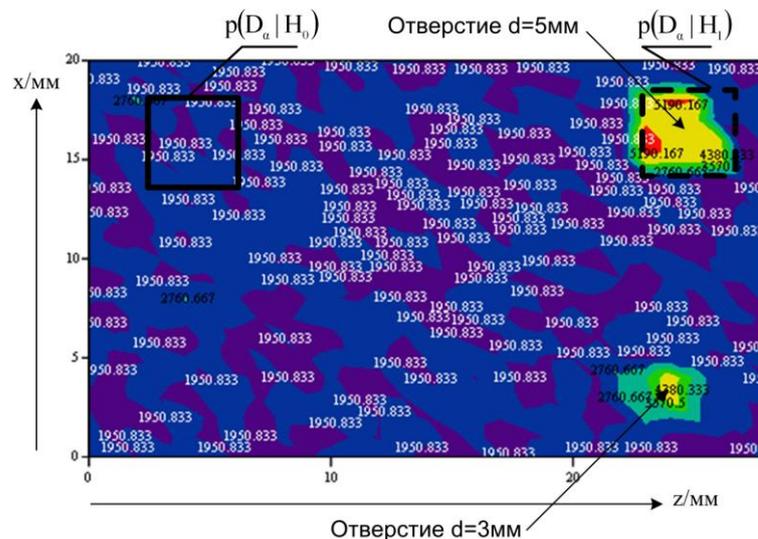
В ходе экспериментов производилось сканирование исследуемой области РПП при помощи разработанной ИВС. В результате сканирования получены исходные экспериментальные массивы напряженностей электрического поля. Далее произведена их обработка на основе разработанных алгоритмов (алгоритм 1, алгоритм 2, ал-

горитм 3) [1,6] и получены контурные графики распределения соответствующих коэффициентов, характеризующих распределение поля поверхностной волны в области с дефектами и в бездефектной области.

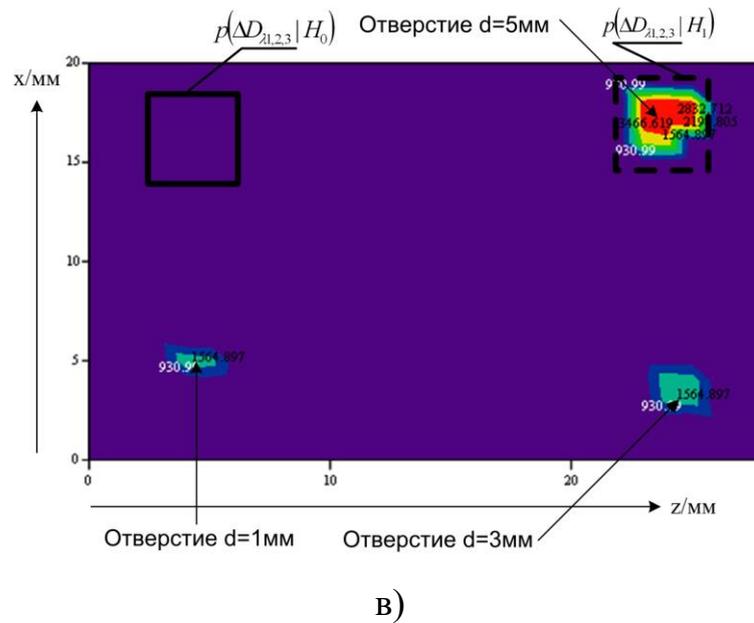
На рисунках 9 а, б, в приведены контурные графики распределения поля поверхностной волны для РПП-М1 с обнаруженными дефектами.



а)



б)



а) – алгоритм 1, б) алгоритм 2, в) алгоритм 3

Рис. 9. Контурные графики распределения поля поверхностной волны

Произведен расчет относительной погрешности измерений ЭФП разработанным лабораторным стендом. Максимальная ее величина (для диапазона толщин покрытий от 10 до 50 мм на примере измерения толщины РПП-М1 и РПП-М2), оказалась равной 3%, относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости и относительная погрешность измерения магнитной проницаемости не превысили $\leq 5\%$, погрешность определения диссипативных величин составила $\delta\epsilon'' \leq 6\%$, $\delta\mu'' \leq 6,5\%$, погрешность модуля волнового сопротивления $\Delta Z = 10\%$. Погрешность измерения модуля волнового сопротивления уменьшена по сравнению с существующими методами более чем на 10%.

Выводы

Разработана ИВС для экспресс-контроля ЭФП и обнаружения дефектов РПП. ИВС позволяет определять ЭФП и обнаруживать дефекты РПП с визуализацией результатов эксперимента в виде трехмерных графиков на экране ПЭВМ. В разработанной ИВС сканирование поверхности РПП производится на основе роботизированной системы с числовым программным управлением и позволяет добиться абсолютной погрешности сканирования 0,01 мм. Математическое обеспечение вычислительной системы повышает точность измерения действительной части диэлектрической проницаемости на 3%, действительной части магнитной проницаемости на 5%, мнимой части диэлектрической проницаемости на 5%, мнимой части магнитной проницаемости на 5% , модуля волнового сопротивления на 10%, и точности определения границ дефектов на 20% по сравнению с существующими ИВС. Кроме того ИВС обеспечивает согласование ЭМВ по волновому сопротивлению с РПП диэлектрического и магнитодиэлектрического типа и инвариантность (нечувствительность) к вариациям зазора между полеобразующими поверхностями проводящих элементов и системы «РПП-металл» за счет косвенных измерений.

Полученные технические характеристики разработанной ИВС позволяют эффективно использовать ее при исследовании ЭФП существующих и разрабатываемых образцов РПП образцов вооружения и военной техники. Кроме того ИВС может быть использована в качестве основы при проектировании и разработке современной аппаратуры контроля параметров РПП вооружения и военной техники, и в частности, перспективных АК военного назначения со сниженной РЛЗ.

Библиографический список

1. Федюнин П.А., Казьмин А.И. Способы радиоволнового контроля параметров защитных покрытий авиационной техники. - М.: Физматлит, 2013. - 190 с.
2. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы Стелс-технологий // Вестник Российской Академии Наук. 2003. Т.73. №9. С.779-787.
3. Комплексы измерительно-вычислительные. Признаки классификации. Общие положения. ГОСТ 26.203-81. - М.: Изд-во стандартов, 1983. - 13с.
4. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. ГОСТ Р 8.596-2002. - М.: Изд-во стандартов, 2003. 92с.
5. Чемодаков А.Л. Описание структуры и алгоритмов функционирования информационно-измерительных систем. – Владивосток: Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 2008. - 18с.
6. Федюнин П.А., Казьмин А.И., Кирьянов О.Е. Алгоритмы контроля и оценки неоднородностей в радиопоглощающих покрытиях // Контроль. Диагностика. 2010. № 7(145). С.60-65.
7. Hossein M., Rahmat-Samii Y. RCS Reduction of Canonical Targets Using Genetic Algorithm Synthesized RAM // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 2000. vol. 48. № 10. pp. 1594-1606.
8. СВЧ способ обнаружения и оценки неоднородностей в диэлектрических покрытиях на металле. Патент РФ № 2507506, / Федюнин П.А., Казьмин А.И., Федюнин Д.П., Хакимов Т.М.; заявл. 23.05.2012; опубл. 20.02.2014.
9. Казьмин А.И. Экспериментальная измерительно-вычислительная система дефектоскопии материалов / Федюнин П.А., Казьмин А.И. // Материалы XIII междуна-

родной научно-методической конференции "Информатика: проблемы, методология, технология", 7-8 февраля 2013г., Воронеж, 2013. Том 3. С.353-357.