

СЕКЦИЯ 3

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

DOI: 10.58168/PPSPM2025_345-351

УДК:004.9

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Е.С. Ильин, А.Н. Потапов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация: в статье подробно рассматриваются современные подходы к оценке работоспособности радиотехнического оборудования. Особое внимание уделяется трем основным направлениям исследований: компьютерному моделированию, лабораторным и натурным испытаниям.

Ключевые слова: методы испытаний РЭУ, компьютерное моделирование, лабораторные измерения, натурные испытания, электромагнитная совместимость, радиолокационные системы, спутниковые ретрансляторы.

METHOD SFOREVAL UATINGTHE EFFICIENCY OF RADIOENGINEERING DEVICES

E.S. Ilyin, A.N. Potapov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract: The article provides a detailed examination of modern approaches to assessing the operational efficiency of radio engineering equipment. Particular attention is given to three main research areas: computer simulation, laboratory testing, and field trials.

Keywords: RED testing methods, computer modeling, laboratory measurements, field testing, electromagnetic compatibility, radar systems, satellite transponders.

Для комплексной оценки работоспособности радиотехнических систем применяется ряд специализированных методик, позволяющих получить достоверные данные об их эксплуатационных характеристиках. Эти подходы включают как теоретические расчеты, так и практические испытания.

Компьютерное моделирование занимает важное место в современных исследованиях. Использование специализированного программного обеспечения (ANSYS HFSS, Altium Designer, AWR Microwave Office) позволяет проводить виртуальные испытания оборудования на этапе проектирования. Электромагнитное моделирование методом конечных элементов дает возможность анализировать параметры антенных систем без изготовления физических прототипов. Численные методы расчета помогают оптимизировать топологию печатных плат и согласующих цепей [1].

В современной инженерной практике цифровое моделирование стало неотъемлемой частью процесса создания радиоэлектронных устройств. Такой подход к проектированию открывает новые возможности для анализа и оптимизации технических решений на всех стадиях разработки - от первоначальной концепции до серийного производства.

Среди наиболее востребованных программных продуктов для электромагнитного анализа следует отметить пакеты HFSS от Ansys, CST Microwave Studio и FEKO компании Altair. Данные программные комплексы используют различные численные алгоритмы для решения фундаментальных уравнений электродинамики, что особенно важно при работе со сложными радиочастотными компонентами. Метод конечных элементов, реализованный в этих программах, обеспечивает детальное исследование полевых характеристик в трехмерных структурах любой конфигурации.

При проектировании антенных устройств виртуальные испытания дают возможность получить точные данные о пространственном распределении излучения, коэффициенте направленного действия и согласовании с фидерной линией. В области СВЧ-техники подобные расчеты помогают найти оптимальные параметры волноводных трактов и согласующих устройств, что существенно снижает энергетические потери. При разработке печатных плат для высокочастотных применений особое внимание уделяется анализу паразитных наводок и учету особенностей используемых диэлектрических материалов.

Совмещенное моделирование, объединяющее анализ распределенных электромагнитных процессов с моделированием дискретных компонентов,

представляет особый интерес для разработчиков. Такой комплексный подход учитывает реальные характеристики электронных компонентов и их взаимное влияние в составе конечного устройства. Современные САД-системы поддерживают полный цикл проектирования, включая выпуск всей необходимой технической документации [2].

Практическая значимость цифрового моделирования особенно очевидна при создании сложных радиотехнических комплексов. В радиолокационной технике оно помогает выбрать оптимальную конфигурацию фазированных антенных решеток и оценить влияние конструктивных элементов на рабочие характеристики. При разработке телекоммуникационного оборудования такие методы позволяют создавать миниатюрные антенные системы с требуемыми параметрами. Особенно ценны эти технологии при проектировании аппаратуры для работы в особых условиях, где проведение натурных испытаний сопряжено с существенными трудностями.

Современные расчетные алгоритмы обеспечивают соответствие между результатами моделирования и экспериментальными данными на уровне 90-95%. Однако для получения достоверных результатов крайне важно корректно задавать начальные условия, точно описывать свойства материалов и правильно выбирать параметры расчетной сетки. Наиболее рациональной методикой является комбинированный подход, сочетающий компьютерное моделирование с выборочными контрольными измерениями на физических образцах.

Лабораторные испытания включают комплекс измерений с применением высокоточного оборудования. Анализаторы спектра и векторные сетевые анализаторы позволяют снимать амплитудно-частотные характеристики в широком диапазоне. Измерение коэффициента стоячей волны (КСВ) проводится с помощью рефлектометров и позволяет оценить качество согласования антенно-фидерных трактов. Для проверки устойчивости к помехам используются камеры экранирования и генераторы шумовых сигналов.

Проведение лабораторных испытаний является неотъемлемой частью процесса разработки и сертификации радиоэлектронного оборудования. В отличие от теоретических расчетов, такие исследования предоставляют фактические данные о рабочих параметрах устройств в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

Современные измерительные лаборатории оснащаются высокоточным оборудованием, позволяющим всесторонне оценивать характеристики радиосистем. Анализаторы спектра производства ведущих компаний обеспечивают детальное исследование частотных параметров сигналов с высокой степенью достоверности. С их помощью выявляют нежелательные излучения и определяют спектральную чистоту передатчиков.

Особую роль в лабораторной практике играют векторные анализаторы цепей, которые дают возможность комплексного исследования параметров рассеяния. Эти приборы незаменимы при настройке согласующих устройств и оценке качества соединений в высокочастотных трактах. С их помощью определяют не только модульные, но и фазовые характеристики сигналов, что особенно важно при работе с цифровыми системами передачи данных [3].

Генераторная аппаратура в лабораторных условиях представлена широким спектром устройств - от классических аналоговых генераторов до сложных векторных систем формирования сигналов. Специальные генераторы шума применяют для проверки устойчивости оборудования к различным видам помех, что особенно актуально для устройств, работающих в условиях насыщенного радиоэфира.

Процесс лабораторных испытаний начинается с тщательной подготовки. На этом этапе выполняют калибровку измерительных приборов, разрабатывают программы испытаний и подготавливают необходимые тестовые сигналы. Особое внимание уделяют созданию репрезентативных условий тестирования, которые должны учитывать все возможные режимы работы оборудования.

Основной этап исследований включает комплекс измерений, направленных на определение ключевых характеристик устройства. Специалисты снимают амплитудно-частотные характеристики, проверяют чувствительность приемных трактов, измеряют уровень нелинейных искажений. Особое значение придают оценке динамического диапазона, который определяет способность системы работать при наличии мощных мешающих сигналов.

Дополнительные испытательные процедуры включают проверку электромагнитной совместимости, тестирование устойчивости к внешним воздействиям и климатические испытания. Для проведения таких исследований используют специальные экранированные камеры, которые позволяют создать контролируемые условия и исключить влияние внешних факторов [4].

Современные измерительные комплексы все чаще строятся на основе принципов автоматизации. Программное управление измерительными приборами позволяет не только повысить точность исследований, но и значительно ускорить процесс сбора и обработки данных. Однако, несмотря на развитие автоматизированных систем, квалифицированная интерпретация результатов по-прежнему требует глубокого понимания физических принципов работы радиотехнических устройств и опыта практической работы с измерительным оборудованием.

Натурные испытания проводятся в реальных условиях эксплуатации. Тестирование дальности связи выполняется на полигонах с варьированием рельефа местности. Оценка многолучевого распространения требует измерений в городской застройке. Климатические испытания включают работу оборудования в термобарокамерах при экстремальных температурах и влажности.

Таблица 1 - Примеры методик испытаний различных типов РЭУ

Тип устройства	Методика испытаний	Измеряемые параметры	Оборудование
Мобильный радиомодем	Камерные испытания ЭМС	Уровень побочных излучений	Экранированная камера, анализатор спектра
Бортовая РЛС	Натурные радиолокационные измерения	Дальность обнаружения, точность	Контрольные радиолокационные отражатели
Спутниковый ретранслятор	Термовакuumные испытания	Стабильность параметров в вакууме	Вакуумная камера с терморегуляцией

Для мобильных радиомодемов особое значение имеют испытания на электромагнитную совместимость. В экранированных камерах измеряют уровень нежелательных излучений и чувствительность к внешним помехам. Эти тесты проводятся с использованием калиброванных антенн и прецизионных измерительных приемников.

Бортовые радиолокационные системы проходят комплексные натурные испытания. Специалисты оценивают реальную дальность обнаружения

типовых целей при различных погодных условиях. Параллельно измеряется точность определения координат с использованием контрольных отражателей с известными характеристиками [5].

Космические ретрансляторы подвергаются особо строгим испытаниям. Термовакuumные камеры имитируют условия космического пространства, позволяя проверить стабильность параметров оборудования при циклических температурных нагрузках и в условиях глубокого вакуума. Эти испытания могут продолжаться несколько недель для полной проверки надежности системы.

Список литературы

1. Авторское свидетельство № 313314 А1 СССР, МПК H04N 17/00. Устройство для настройки радиотехнических устройств: № 1373163/26-9: заявл. 05.11.2023: опубл. 31.08.2023 / Е. В. Антонов, К. М. Демченко, Е. Ф. Каулин [и др.]. – EDN HLTAIZ.
2. Столбиков, А. В. Устройство для подгонки элементов радиотехнических устройств / А. В. Столбиков, Г. П. Шопин // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – 2022. – Т. 3, № 2. – С. 24-28. – EDN OIENPB.
3. Авторское свидетельство № 144640 А1 СССР, МПК H04L 7/04, H04L 5/26. Устройство для программной перестройки радиотехнических устройств на заранее заданные фиксированные частоты: № 688470: заявл. 10.12.2023: опубл. 01.01.2023 / Л. И. Гончар, А. И. Ставицкий. – EDN YGCLAQ.
4. Беликов, А. Н. Использование компьютерного моделирования при проектировании радиоэлектронных устройств / А. Н. Беликов, Д. Г. Рыбаков // Новые информационные технологии в научных исследованиях: Материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 22–24 ноября 2023 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф.Уткина, 2023. – С. 178-179. – EDN OSXGVW.Евграфов, В. В. Виброзащита радиотехнических устройств демпфирующими слоями: специальность 05.12.04 "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Евграфов Владимир Викторович. – Владимир, 2023. – 167 с. – EDN NMMSSL.

5. Кучерук, Д. А. Математическая модель технического диагностирования радиоэлектронных устройств с применением вращающегося электромагнитного поля / Д. А. Кучерук // Научные технологии. – 2023. – Т. 21, № 9. – С. 49-56. – DOI 10.18127/j19998465-202009-06. – EDN STMNMMU.

References

1. Author's Certificate No. 313314 A1 USSR, IPC H04N 17/00. Device for Tuning Radio Engineering Equipment: No. 1373163/26-9: filed November 5, 2023; published August 31, 2023 / E. V. Antonov, K. M. Demchenko, E. F. Kaulin [et al.]. – EDN HLTAIZ.
2. Stolbikov, A. V., & Shopin, G. P. Device for Adjusting Elements of Radio Engineering Equipment. In Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Scientific and Practical Conference, 2022, Vol. 3, No. 2, pp. 24–28. – EDN OIEHPB.
3. Author's Certificate No. 144640 A1 USSR, IPC H04L 7/04, H04L 5/26. Device for Software-Based Retuning of Radio Engineering Equipment to Predefined Fixed Frequencies: No. 688470: filed December 10, 2023; published January 1, 2023 / L. I. Gonchar, A. I. Stavitsky. – EDN YGCLAQ.
4. Belikov, A. N., & Rybakov, D. G. Use of Computer Simulation in the Design of Radioelectronic Devices. In New Information Technologies in Scientific Research: Proceedings of the 28th All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists, Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, November 22–24, 2023. – Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, 2023. – pp. 178–179. – EDN OSXGVW.
5. Evgrafov, V. V. Vibration Protection of Radio Engineering Devices by Damping Layers: Specialty 05.12.04 “Radio Engineering, Including Television Systems and Devices”: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. – Vladimir, 2023. – 167 p. – EDN NMMSSL.