

На правах рукописи



ГЛОТОВ Вадим Валерьевич

**МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
ПЕЧАТНОГО МОДУЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭКВИВАЛЕНТНОГО  
ДИПОЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе  
системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: Ромащенко Михаил Александрович,  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Гизатуллин Зиннур Марселевич,  
доктор технических наук, доцент,  
Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ,  
профессор кафедры систем  
автоматизированного проектирования

Самоцвет Николай Андреевич,  
кандидат технических наук,  
ООО «ИЦ Самоцвет», компания-  
участник проектов Инновационного  
центра «Сколково»,  
генеральный директор

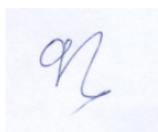
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский  
государственный технический  
университет»

Защита состоится 20 апреля 2023 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, ауд. 216 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте [schgeu.ru](http://schgeu.ru).

Автореферат разослан 20 февраля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета  
канд. техн. наук, доцент



Фёдоров Сергей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Задача обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) появилась как результат научно-технического прогресса в современной радиотехнике, а также из-за постоянного увеличения общего количества РЭС и, как следствие, попадания РЭС во все области жизнедеятельности человека. Кроме того, на возникновение данной задачи повлияли следующие аспекты: недостаточное количество свободных от помех радиоканалов во всех существующих изученных спектрах; возрастание всеобщего уровня помех; совершенствование функционала и усложнение конструкций РЭС; непрерывное расширение спектра частот, сокращение продолжительности сигнала; концентрация разных типов РЭС в одном месте (авиалайн, морское судно); миниатюризация РЭС, приводящая к потере энергии полезных сигналов и уменьшению отношения сигнал-помеха.

Обеспечение ЭМС может выполняться на различных функциональных уровнях, это позволяет более эффективно решать определенные типы задач. Одним из таких уровней является внутриаппаратурный - уровень обеспечения ЭМС в пределах одного РЭС. Согласно определению данного уровня, необходимым является рассмотрение вопросов по обеспечению ЭМС на ранних этапах проектирования скоростных высокопроизводительных РЭС, функционирующих на частотах от 900 МГц - 3 ГГц. Поскольку основные помехи создаются протекающими токами, то для оценки ближнего поля на внутриаппаратурном уровне в данной области частот, необходимо уделять внимание магнитной составляющей ближнего поля. Магнитные поля, излучаемые от печатного модуля, возможно воспроизвести только на основе детального 3D моделирования, используя большие вычислительные системы, что в итоге приведет к удорожанию РЭС из-за более трудоемких и времязатратных процедур. В инженерной практике качественно оценить ЭМС на основании существующих математических моделей и методик не представляется возможным из-за отсутствия в элементной базе параметров, описывающих поведение на высоких частотах. Современная микроэлектроника идет по пути уменьшения рабочих напряжений при одновременном увеличении рабочих токов. Это обусловлено уменьшением норм топологического процесса и микроминиатюризации компонентной базы. Целесообразным представляется использование в совокупности со средствами САПР альтернативных методов, позволяющих упростить исходную задачу, одним из которых является эквивалентное дипольное моделирование. Под эквивалентным дипольным моделированием подразумевается процесс замены реальных происходящих электромагнитных взаимодействий на их описание через элементарные диполи, в полной совокупности дающие адекватное представление процессов. В свою очередь под диполем подразумевается простая для рассмотрения структура,

создающая магнитное взаимодействие эквивалентное фрагменту рассматриваемой конструкции печатного модуля.

Таким образом, актуальность темы заключается в необходимости совершенствования существующих и разработки новых методик анализа ближнего поля конструкций печатного модуля с помощью подходов эквивалентного дипольного моделирования.

### **Степень научной разработанности**

Значительный вклад в изучение и практическое исследования вопросов внутриаппаратурной электромагнитной совместимости внесли отечественные ученые и разработчики: Кечиев Л.Н., Зернов Н.В., Чернушенко А.М., Быховский М.А., Васехо Н.В., Волков Ю.В., Жильцов А.У., Носов В.И., Севостьянов С.В., Сорокин А.С., Сухоруков С.А., Борисов Ю.П., Лавров А.С., Резников Г.Б., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Кириллов В.Ю., Чермошенцев С.Ф.; среди зарубежных исследователей мировую известность получили работы Henry W.Ott., Ricketts L.W., Bridges J.E., Miletta J., Harrington R.F., Garret H.B., Strong A.W., Barnes J.R., Clayton R.P., Weston D.A., Lee C.Y., Heise E.R. Существуют также экспериментальные методы исследования ЭМС на внутриаппаратурном уровне, реализуемые с помощью сканеров ближнего электромагнитного поля. Разработка и исследование данных сканеров ведется фирмами - Noiseken (Япония), Detectus AB (Швеция) и EMSCAN (Канада).

Применение подходов с использованием эквивалентного дипольного моделирования, реализуемого в программном и методическом обеспечении, позволит провести многократное моделирование и оптимизацию на ранних этапах разработки РЭС.

### **Цель и задачи исследования**

Цель - разработка и совершенствование методик анализа ближнего поля конструкций печатных модулей для обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости с помощью эквивалентного дипольного моделирования. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- провести оценку современного состояния исследований в области внутриаппаратурной электромагнитной совместимости РЭС;
- провести совершенствование математического обеспечения для описания процессов в ближнем магнитном поле путем применения математических моделей эквивалентного дипольного моделирования;
- разработать методику анализа данных, описывающую ближнее магнитное поле печатного модуля, отличающуюся применением дипольной математической модели;
- провести совершенствование алгоритма процесса сканирования печатного модуля с адаптивным шагом перемещения, отличающегося применением коэффициента шага, учитывающего градиент ближнего магнитного поля;

– разработать методику сбора данных о магнитной составляющей ближнего поля конструкций печатных модулей, адаптированную для специализированных технических средств;

– провести экспериментальное исследование предложенных методик с использованием сканера ближнего поля и сравнить полученные результаты с данными моделирования в специализированном САПР.

### **Научная новизна результатов исследования**

В данной диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующие научную новизну:

- математическая модель магнитной составляющей ближнего поля конструкций печатных модулей, отличающаяся использованием эквивалентного дипольного преобразования;

- методика анализа данных для описания ближнего магнитного поля печатного модуля, отличающаяся применением дипольной математической модели;

- алгоритм процесса сканирования печатного модуля с адаптивным шагом перемещения, отличающийся применением коэффициента шага, учитывающего градиент ближнего магнитного поля;

- методика сбора экспериментальных данных, описывающая магнитную составляющую ближнего поля печатного модуля, которая отличается применением градиентной математической модели для определения адаптивного шага перемещения.

### **Теоретическая значимость результатов диссертации**

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и совершенствовании методик анализа ближнего поля печатного модуля для обеспечения внутриаппаратурной ЭМС конструкции печатного модуля с помощью эквивалентного дипольного моделирования.

### **Практическая значимость результатов диссертации**

Практическая часть работы состоит в том, что предложенные в работе методики обеспечивают сокращение сроков и уменьшают вычислительные ресурсы при разработке РЭС. Основные результаты работы в виде моделей и методик внедрены на предприятиях: АО «НИИЭТ», АО НВП «Протек», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ» для подготовки магистров по направлению 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств (профиль «Автоматизированное проектирование и технология радиоэлектронных средств специального назначения» и 12.04.01 Приборостроение (профиль «Автоматизированное проектирование приборов и комплексов»). По результатам выполнения диссертационного исследования было получено четыре Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ - №2018618333 «Программа расчета зон приема сигнала с учетом помеховой обстановки», №2018612831 «Программа сканера ближнего электромагнитного поля», №2019612102 «Программа для анализа ближнего электромагнитного поля печатных плат», № 2022611295 «Программа для анализа ближнего электромагнитного поля на внутриаппаратурном уровне».

На устройство и предложенный в работе способ получен патент на полезную модель №189820 «Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат».

Диссертационное исследование было выполнено в ФГБОУ ВО «ВГТУ» в рамках одного из основных научных направлений - «Перспективные радиоэлектронные и лазерные устройства и системы передачи, приема, обработки и защиты информации» при разработке ГБ НИР 2016.17 «Исследование и разработка перспективных методов проектирования радиоэлектронных средств на основе комплексного моделирования и оптимизации» и ГБ 2019.17 «Исследование и разработка методов комплексного анализа и оптимального синтеза на этапах функционального и конструкторского проектирования РЭС». Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам области исследования паспорта специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»: п.7 «Разработка и исследование методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, включая радиосистемы телевидения и связи, методов разрушения и защиты информации в этих системах» и п.16. «Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания, и сертификации радиотехнических устройств и систем, включая черно-белые, цветные, спектрональные, инфракрасные, терагерцовые и многоракурсные телевизионные системы, пассивные и активные системы объемного телевидения, в том числе голографические».

**Методология и методы исследования** основываются на принципах системного подхода, электродинамики, теории электромагнитной совместимости и помехоустойчивости, теории цепей, методах математической физики, вычислительной математики, математического программирования и оптимизации, математического моделирования и экспериментального исследования, теории автоматизированного проектирования.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Применение эквивалентного дипольного моделирования печатного модуля позволяет упростить задачу моделирования электромагнитных процессов в ближней зоне и учесть влияние конструктивных элементов печатных модулей для обеспечения внутриаппаратурной ЭМС при сохранении требуемой адекватности. Сокращение времени моделирования при таком подходе составляет до 30%, по сравнению с традиционным способом.

2. Сбор данных о параметрах ближнего поля печатного модуля с использованием адаптивного шага сканирующей установки позволяет ускорить процесс сканирования на 35-45% при сохранении точности и полноты получаемых данных.

3. Технические решения, базирующиеся на предложенных подходах, позволили на 10-15% повысить вероятность бесспорной работы

слаботочных компонентов передатчиков специальных сигналов (модулей управления и синхронизации, модулей формирования и коммутации специальных сигналов) в условиях воздействия электромагнитных полей, обусловленных функционированием сильноточных модулей (усилителей и выходных полосовых фильтров), а также на 5-7% процентов сократить трудозатраты на проектирование печатных модулей.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертационной работе результатов базируется на совпадении полученных результатов с выводами и заключениями других исследователей и внедрение их в производственный процесс профильных предприятий, а также согласование результатов моделирования и проведенных экспериментов.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 18-ой Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». 2015 г., г.Красноярск;
- 18-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникации». 2015 г., г.Рязань;
- Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» в период с 2015 по 2018 г.г., г.Тамбов;
- 3-ей Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости». 2016 г., г.Москва;
- Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации ФТИ» в период с 2017 по 2021 г.г., г.Екатеринбург;
- 14-ой Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии». 2017 г., г.Сочи;
- Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика». 2018 г., г.Воронеж.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликована 31 научная работа, из них 9 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, 4 статьи, индексируемые в базе данных Scopus, 4 зарегистрированных программы для ЭВМ и один патент на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 91 источник. Основная часть работы изложена на 110 страницах, содержит 32 рисунка и 20 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, предложены пути решения

поставленных задач, приведено краткое описание работы, изложены основные научные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные аспекты ЭМС РЭС, а также современные направления обеспечения внутриаппаратурной ЭМС.

Усовершенствование и миниатюризация электрорадиоэлементов, появление новых функциональных материалов, а также разработка новых подходов и методов проектирования - все это, с одной стороны, позволяет разработчику существенно повысить эффективность своей работы и получить принципиально новый функциональный уровень разработок, но, с другой стороны, предъявляет повышенные требования к квалификации.

Существующие теоретические и математические модели, такие как – метод моментов, метод конечных элементов, а также мощные САПР (Ansys HFSS, CST Studio Suite) не подходят для быстрой оценки ближнего поля печатного модуля из-за их сложности и времени моделирования.

В данной диссертационной работе в соответствии с поставленной целью и задачами исследования рассматривается внутриаппаратурный уровень обеспечения ЭМС. Данный уровень характеризуется присутствием ближнего электромагнитного поля, распространяющегося на расстоянии  $r < \lambda/2\pi$ . Одной из особенностей решения задач обеспечения ЭМС является уход от традиционного субъективного подхода конкретного инженера к внедрению объективных методов оценки и предлагаемых способов обеспечения внутриаппаратурной ЭМС. Одним из подходов, позволяющих реализовать такой принцип, является использование эквивалентного дипольного моделирования, а именно, описание конструкций печатного модуля через соответствующие диполи.

**Во второй главе** разработана методика анализа данных, описывающая ближнее магнитное поле печатного модуля, отличающаяся применением дипольной математической модели. На рисунке 1 продемонстрирован основной принцип замены печатного модуля эквивалентной дипольной моделью. Цель замены состоит в том, чтобы заменить источники излучения печатного модуля массивом эквивалентных источников - диполями, которые должны генерировать значение поля, наилучшим образом согласующиеся со значениями элементов печатного модуля.

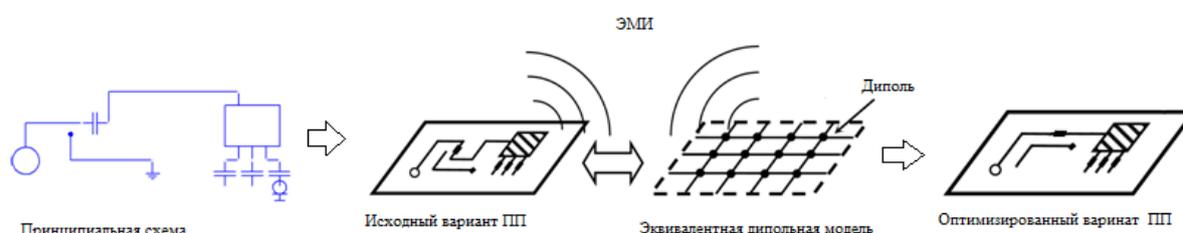


Рис.1. Основной принцип эквивалентного дипольного преобразования

Точность эквивалентной модели, а также количество используемых диполей, определяется шагом накладываемой сетки на печатный модуль, в узлах которой располагаются диполи. Шаг сетки является адаптируемым, и

подбирается в зависимости от класса точности изготовления печатной платы. Поскольку большинство печатных плат обладают относительно малой толщиной, то эквивалентные точечные диполи можно разместить на плоской поверхности вблизи печатного модуля. При этом каждый диполь описывает элементарный участок цепи, представленный в виде простейшего конструктивного элемента (участок печатного проводника, часть вывода элемента, геометрия примитивов, на которые разбиваются корпуса элементов).

Для вычисления напряженности магнитного поля печатного модуля каждый диполь в декартовых системах координат разлагается на три магнитных компонента -  $H_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$ . Для описания параметров магнитного поля с помощью эквивалентной модели используется основной параметр диполей – момент (М).

В системе уравнений 1 представлено определение магнитных составляющих диполя:

$$\begin{aligned} H_x &= M \cdot \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r^4} \cdot (x-x_0) \cdot (z-z_0) \cdot (jkr + 3 + \frac{3}{jkr}) \\ H_y &= M \cdot \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r^4} \cdot (y-y_0) \cdot (z-z_0) \cdot (jkr + 3 + \frac{3}{jkr}) \\ H_z &= M \cdot \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \left[ \frac{(z-z_0)^2}{r^2} \cdot \left( j + \frac{3}{kr} + \frac{3}{jk^2r^2} \right) - \left( j + \frac{1}{kr} + \frac{1}{jk^2r^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k$ -волновое число ( $m^{-1}$ ), а  $r$ -расстояние от диполя до точки вычисляется (м):

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (2)$$

Момент диполя вычисляется по формуле:

$$M = \mu_0 \cdot I \cdot r^2 \cdot l \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $1,25 \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $I$  – сила тока (А),  $r$  – расстояние диполя от точки измерения (м),  $l$  – расстояние между диполями (м).

Для построения карты напряжённости магнитного поля печатного модуля на основании эквивалентного дипольного моделирования может применяться процедура упрощения, которая включает «удаление» и «объединение». Удаление применяется, если абсолютная величина момента диполя очень мала. При малом значении момента диполя он может быть удален из рассмотрения, что не приведет к существенной погрешности, так как его малый вклад в общее поле будет компенсирован другими диполями. Объединение применяется, если момент диполя очень похож на момент соседних диполей, поскольку вклад этих диполей в общее поле может быть аппроксимирован одним диполем, помещенным в центр исходных диполей.

На основании предложенной математической модели разработана методика анализа данных, описывающая ближнее магнитное поле печатного модуля, отличающаяся применением дипольной математической модели. На рисунке 2 представлены основные этапы разработанной методики: получение электрической принципиальной схемы, создание модели ПМ в САПР, импорт модели в формате ODB, загрузка модели в программный модуль

проектирования анализа ближнего электромагнитного поля печатных плат, построение эквивалентной дипольной модели ПМ, вычисление интенсивности составляющей эквивалентной дипольной модели, суммирование полученных значений от дипольной модели, построение напряженности магнитной компоненты ближнего поля печатного модуля.

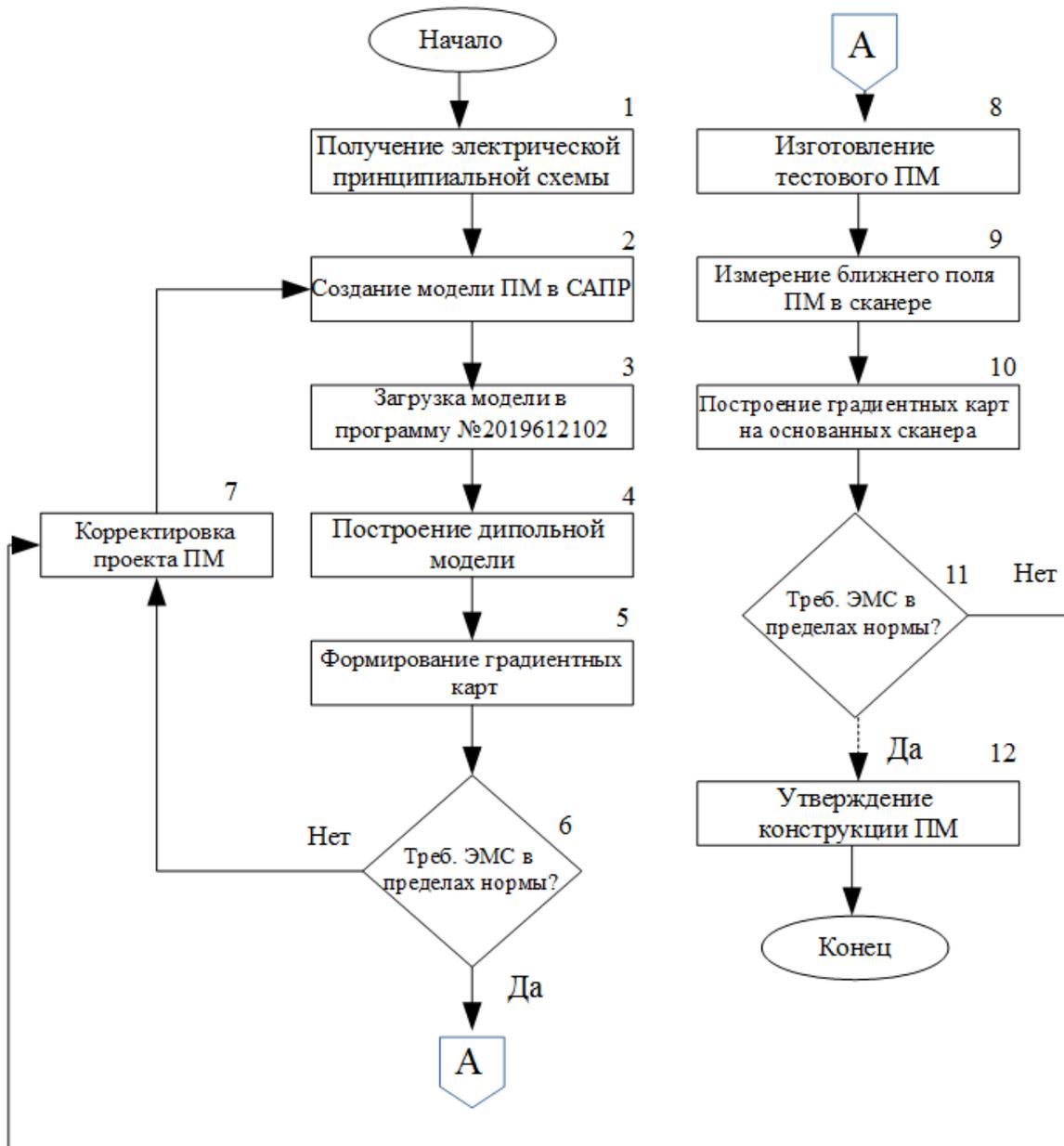


Рис.2. Основные этапы методики получения и анализа данных характеристик ближнего поля печатных модулей

**В третьей главе** разработана методика сбора экспериментальных данных, описывающих магнитную составляющую ближнего поля печатного модуля, которая отличается применением градиентной математической модели для адаптивного шага перемещения.

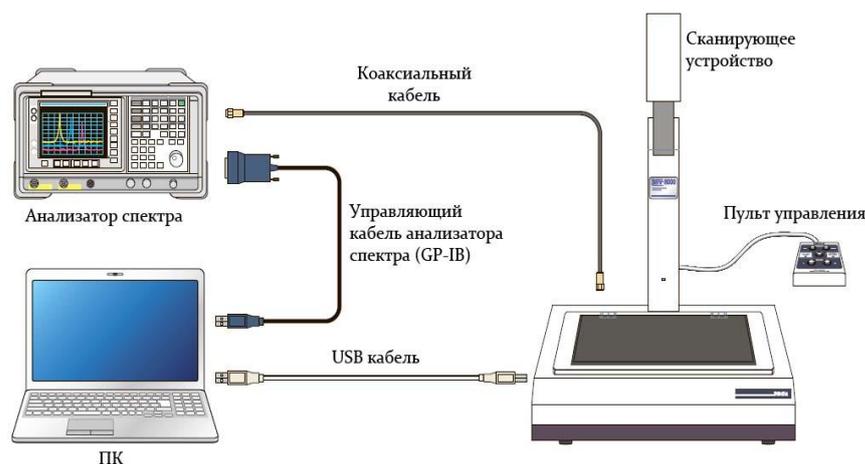


Рис.3. Структура аппаратно-программного комплекса сканера ближнего поля

Сканирующее устройство, показанное на рисунке 3, последовательно перемещает датчик магнитного поля с адаптивным шагом вдоль координатных осей в непосредственной близости от ПМ. В каждой узловой точке снимаются параметры магнитного поля в диапазоне рабочих частот тестируемого устройства. При этом шаг перемещения пробника, используемого сканирующим устройством, может изменяться и вычисляться для каждой точки перемещения, учитывая компромисс между скоростью и требуемой точностью:

$$v(t) = \begin{cases} 0,5 \cdot v_f (1 - \cos(\frac{\pi t}{T})), & (0 < t \leq T), \text{ фаза ускорения} \\ v_f, & (T < t \leq T_d), \text{ фаза равномерного движения} \\ 0,5 \cdot v_f (1 - \cos(\frac{\pi(t-T_d-T)}{T})), & (T_d < t \leq T_d - T), \text{ фаза замедления} \end{cases} \quad (4)$$

где  $t$  - время перемещения (с),  $T$  – время ускорения и замедления  $\theta$  (с),  $T_d - T$  – время замедления (с),  $v_f$  - постоянная скорость (м/с),  $T_d$  – время активного состояния двигателя (напряжение подано) (с).

Шаг перемещения вычисляется по формуле:

$$h(T_d) = \int_0^{T_d+T} v(t) dt = v_f T_d \quad (5)$$

Требуемый адаптивный шаг перемещения определяется:

$$h_a(T_d) = v_f \cdot T_d \cdot k_{ш} \quad (6)$$

где  $k_{ш} = \frac{1}{1 + \text{grad}H(x,y)}$  – коэффициент шага, зависящий от изменения напряженности магнитного поля.  $H(x,y)$  – магнитная компонента ближнего поля.

Принимая во внимание структуру сканера с S-образным маршрутом сканирования, была реализована методика сбора экспериментальных данных магнитной составляющей ближнего поля печатного модуля, представленная на рисунке 4. Этапами реализации данной методики являются – установка печатного модуля в аппаратно-программный комплекс сканирования ближнего поля, определение области сканирования, подключение питающей станции, запуск процесса сканирования, снятие ортогональных составляющих с ПМ, преобразование полученных данных в напряженность, суммирование полученных данных о напряженности ПМ, построение карт

напряженности магнитного поля.

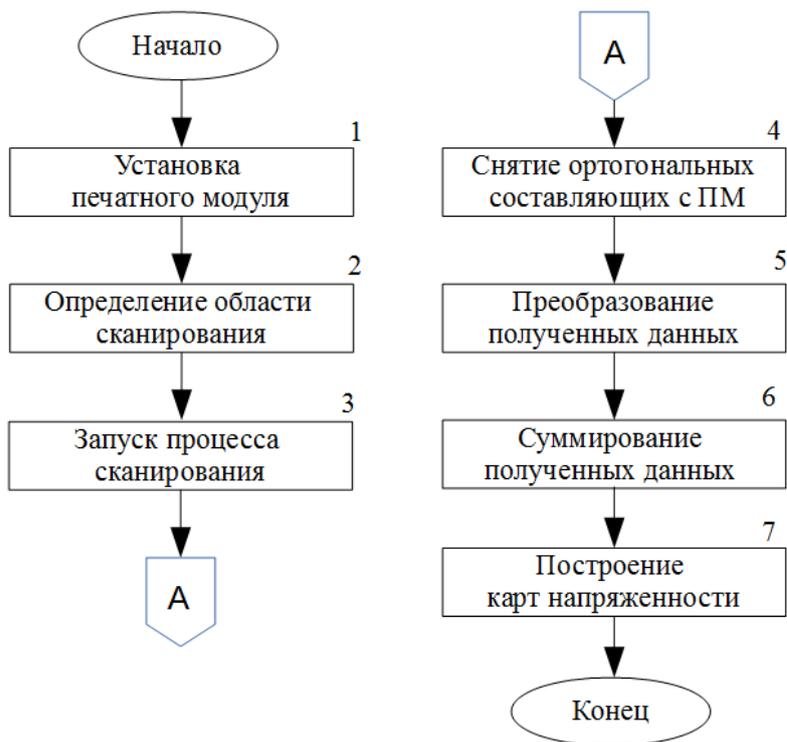


Рис.4. Основные этапы методики сбора экспериментальных данных магнитной составляющей ближнего поля печатного модуля.

**В четвертой главе** проведен сравнительный анализ полученных значений напряженности магнитной составляющей в ближнем поле с помощью методики анализа данных ближнего поля печатного модуля, основанной на подходах эквивалентного дипольного моделирования, и с помощью аппаратно-программного комплекса сканирования ближнего поля.

На рисунке 5 показан ПМ усилителя ВЧ, работающий на частоте 1 ГГц, и его топологическая модель в САПР. Усилитель реализован на микросхеме ADL5535.

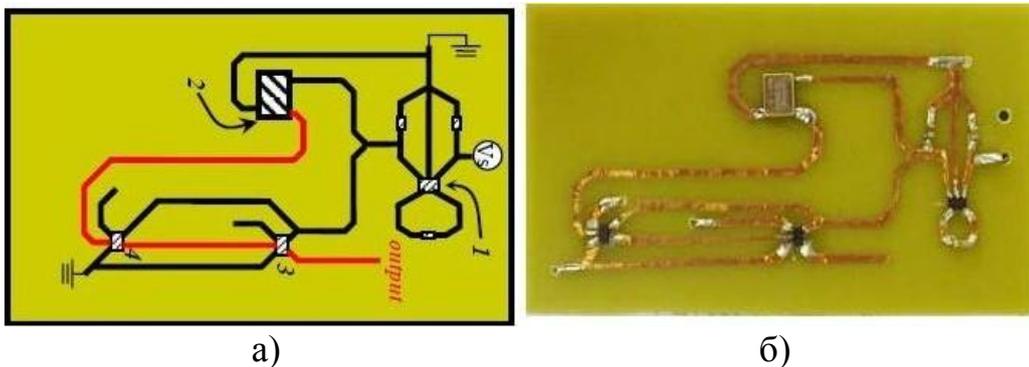


Рис.5. Тестовый печатный модуль:  
а) модель в САПР; б) исходный экспериментальный ПМ;

Тестовый печатный модуль был изготовлен по 3-ему классу точности, то есть шаг накладываемой сетки равен 0,25 мм. Общее количество диполей,

согласно размерами печатного модуля (50 мм x 100 мм), равно = 800. На рисунке 6 показана модель печатного модуля в программе для анализа ближнего электромагнитного поля печатных плат. Эксперимент проводился на частоте 1100 МГц.

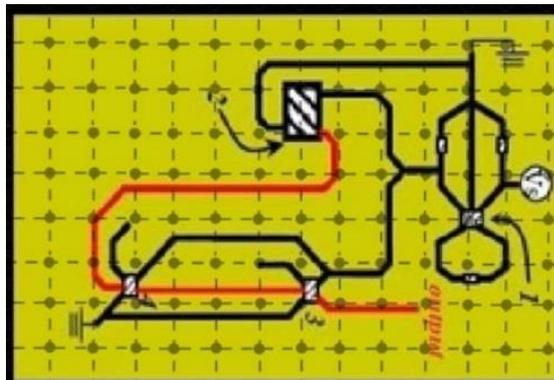


Рис.6. Эквивалентная дипольная структура для тестового печатного модуля

На рисунке 7 представлено сравнение карт напряженности магнитного поля на расстоянии 10 мм от ПМ.

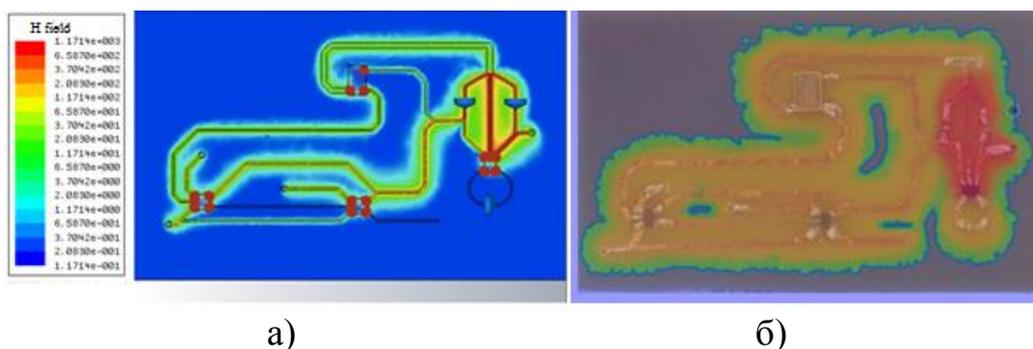


Рис.7. Значения напряженности магнитного поля, полученные: а) на основании методики эквивалентного дипольного моделирования; б) с помощью сканера ближнего поля.

На рисунке 8 представлено сравнение градиентных карт напряженности магнитного поля после оптимизации

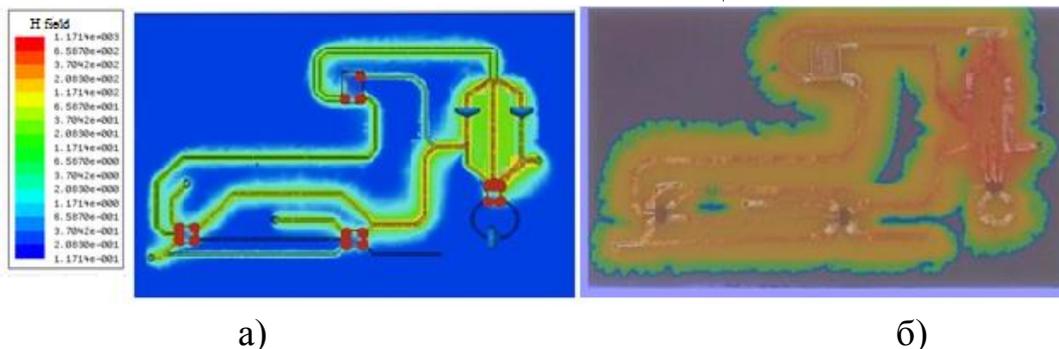


Рис.8. Значения напряженности магнитного поля после оптимизации: а) на основании методики эквивалентного дипольного моделирования; б) с помощью сканера ближнего поля.

Таблица – Результаты измерения напряженности ближнего магнитного поля

	Координаты (40,10)	Координаты (90,20)	Координаты (130,30)
Методика эквивалентного моделирования	65,56 мА/м	67,22 мА/м	28,88 мА/м
Сканер ближнего поля	58,07 мА/м	62,39 мА/м	26,05 мА/м

Так относительная погрешность анализа данных ближнего магнитного поля вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{F-P}{P} \cdot 100\% \quad (6)$$

F – данные, полученные на основании методики анализа ближнего поля конструкций ПМ; P – данные, полученные на основании эксперимента.

Так относительная погрешность анализа данных ближнего магнитного поля (на высоте 10 мм от ПМ) равна:

$$Q_1 = \frac{65,56-58,07}{58,07} \cdot 100\% = 12,8\%; \quad Q_2 = \frac{67,22-62,39}{62,39} \cdot 100\% = 7,7\%;$$

$$Q_3 = \frac{28,88-26,05}{26,05} \cdot 100\% = 10,8\%;$$

Средняя погрешность измерений вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_1+Q_2+\dots+Q_N}{N} \quad (7)$$

$$Q_{\text{ср}} = \frac{12,8+7,7+10,8}{3} = 10,4\%.$$

Средняя погрешность, основанная на эквивалентном преобразовании на высоте 10 мм от ПМ, равна 10,4%.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного научного исследования в рамках диссертации были получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Проведена оценка современного состояния исследований в области ЭМС РЭС, которая показала, что усовершенствование и миниатюризация электрорадиоэлементов, появление новых функциональных материалов, повышение рабочих частот будет накладывать на производителей и разработчиков все более жесткие ограничения в части обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости. При производстве высокоэффективных современных РЭС актуальным является уход от традиционного субъективного подхода инженера к внедрению объективных методов оценки и предлагаемых способов обеспечения внутриаппаратурной ЭМС. Таким образом, актуальным является разработка совокупности

аппаратных средств, программного и методического обеспечения, которая позволит провести многократное измерение и моделирование на этапе проектирования радиоэлектронных средств, а в перспективе даст набор технических решений для обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости на предтопологическом уровне.

2. Для проведения анализа данных ближнего поля конструкций печатного модуля предложены подходы, базирующиеся на эквивалентном моделировании, в основе которого лежит математическое преобразование – диполь-диэлектрик-проводящая плоскость. Такой подход позволяет упростить задачу моделирования процессов в ближней зоне и учесть влияние конструктивных элементов печатного модуля для обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости при сокращении времени моделирования до 30%.

3. Представлена методика получения и анализа данных характеристик ближнего поля печатных модулей, отличающаяся влиянием конструктивных элементов радиоэлектронных средств и позволяющая спрогнозировать вероятность прохождения предсертификационных испытаний. Применение данной методики позволяет разработчику получить объективные данные распределения напряженности ближнего поля конструкций печатного модуля и оперативно определить критические зоны, в наибольшей степени влияющие на обеспечения ЭМС и помехоустойчивости устройства. Таким образом, разработчик на раннем этапе проектирования может предпринять необходимые проектные меры для гарантированного прохождения сертификационных испытаний в части обеспечения требования электромагнитной совместимости.

4. Разработана структура аппаратно-программного комплекса сканирования ближнего электромагнитного поля для наиболее распространенных формы и типа размеров печатных модулей, позволяющая ускорить процесс получения данных о величинах электрической и магнитной компоненты ближнего поля. Для данной структуры предложена математическая модель процесса сканирования печатного модуля, отличающаяся адаптивным шагом движения измерительного пробника, учитывающая сложный профиль современных печатных модулей.

5. Предложена методика сбора экспериментальных данных магнитной составляющей ближнего поля печатного модуля, отличающаяся адаптивным шагом перемещения пробника аппаратно-программного комплекса сканирования ближнего поля. Положенный в основу данной методики адаптивный шаг движения измерительного пробника позволяет ускорить процесс сканирования на 35-45 % при сохранении точности и полноты получаемых данных.

6. В результате проведения экспериментального исследования предложенных моделей, методик и сравнения полученных результатов с натурными экспериментами было установлено, что значения напряженности ближнего поля в обоих случаях отличаются на величину 15-20%. Учитывая

инженерно-практическую направленность предлагаемых методик и их основную ориентацию на многократное повторение, можно сделать вывод о целесообразности применения данных подходов в реальной практической деятельности инженеров.

7. Технические решения, базирующиеся на предложенных в диссертации подходах, были внедрены в практическую деятельность АО «НИИЭТ», а именно к разрабатываемым модулям усилителей мощности, включая изделия категории качества «ВП», что позволило получить оценочный выигрыш для разработки радиотехнических модулей порядка 3%.

Предложенные методики были использованы в АО НВП «Протек» при конструировании перспективного моноблочного радиопередатчика специальных сигналов, реализующего технологию активной передающей фазированной антенной решетки, в интересах деструктивного воздействия на процессы приема информации несанкционированными радиоэлектронными средствами. Внедрение полученной методики позволило на 10-15% повысить вероятность бесбойной работы слаботочных компонентов передатчиков специальных сигналов (модулей управления и синхронизации, модулей формирования и коммутации специальных сигналов) в условиях воздействия электромагнитных полей, обусловленных функционированием сильноточных модулей (усилителей и выходных полосовых фильтров), а также на 5-7% процентов сократить трудозатраты на проектирование печатных модулей.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

*Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Глотов В.В. Процедура моделирования ближнего электромагнитного поля печатных плат в задачах обеспечения ЭМС / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко, С.Ю. Белецкая // Радиотехника. - 2016. - № 6. - С. 15-18.
2. Глотов В.В. Методика оценки ближнего электромагнитного поля методом эквивалентной модели / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. – Т. 10 - №4. – С. 44-47.
3. Глотов В.В. Методика оценки электромагнитных характеристик печатных плат в закрытых конструкциях / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2017.– Т. 13 - №2. – С. 71-74.
4. Глотов В.В. Оптимизация дипольной модели путем генетических алгоритмов / Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2017. – Т. 13 - №3. – С. 87-91.
5. Глотов В.В. Оптимизация радиоэлектронных компонентов по критериям внутриаппаратурной электромагнитной совместимости / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2018. – Т. 14 - №4. – С. 103-107.

6. Глотов В.В. Модель восприимчивости печатных плат к внешним электромагнитным воздействиям / Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2018. – Т. 14 -№3. - С. 125-128.

7. Глотов В.В. Прогнозирование электромагнитных помех в ближнем поле методом Грина / В.В. Глотов, Т.С. Глотова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2019. Том 15, №5 С.78-83.

8. Глотов В.В. Эквивалентная дипольная модель для оценки ближнего поля конструкций РЭС / Глотов В.В. Глотова Т.С., Иваницкий А.С. // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2020. Том 16, № 5. С. 102-106.

9. Глотов В.В. Смешанная характеристика s-параметров дифференциальных структур / Глотова Т.С., Журавлёв Д.В., Глотов В.В // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2021. Том 17, № 1. С. 74-78.

*Публикации в международной базе Scopus:*

10. Glotov V.V. Methods for determination of near electromagnetic field/ V.V. Glotov, M.A. Romashchenko, O.Y. Makarov, A.V. Muratov // International Journal of Applied Engineering Research. - Volume 11, Number 18 (2016) pp. 9519-9525.

11. Glotov V.V. Mathematical Model for Analysis of near and Far Field Characteristics based on Equivalent Transformation / A.V. Bashkirov, I.V. Ostroumov, V.V. Glotov, S.N. Panychev, S.Y. Beletskaya // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020.

12. Glotov V.V. Integrated Circuit Modeling by means of Equivalent Modeling / A.V. Bashkirov, I.V. Ostroumov, V.V. Glotov, V.M. Pitolin, Y.S. Balashov // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, 9271399.

13. Glotov, V.V. Analysis of methods and means for estimating losses in magnetic components caused by proximity effect and skin effect / A.V. Bashkirov, N.Yu. Veretennikov, V.M. Pitolin, A.S. Demikhova / Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2032(1), 012001.

*Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций:*

14. Глотов В.В. Классификация и состав уровней обеспечения ЭМС / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Современные проблемы радиоэлектроники: сбор. науч. тр. – К. ИИФиРЭ. – 2015. - С. 296-298.

15. Глотов В.В. Использование САД – системы EMCOS PCB VLAB в задачах обеспечения ЭМС / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникации: материалы 18-й Международной науч.-техн. конф. – М. Горячая-линия Телеком, - 2015. – С. 61-63.

16. Глотов В.В. Методы анализа состояния обеспечения ЭМС ЭС / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ / Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ. – Воронеж. - Издательство ФГБОУ ВО «ВГТУ». - 2016. - С. 35-37.

17. Глотов В.В. Основы внутриаппаратурной электромагнитной совместимости / Молодежь в науке: новые аргументы: сборник научных работ III-го международного молодежного конкурса. - Липецк: Научное партнерство «Аргумент». - 2016.- Часть II. – С. 26-28.

18. Глотов В.В. Методы определения ближнего электромагнитного поля / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах: материалы 3-ей международной конференции с элементами научной школы. – Тамбов. - Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ». – 2016. - С. 285-286.

19. Глотов В.В. Моделирование карты распределения электромагнитного поля в EMCoS PCB ViaB / Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости: руды третьей всероссийской научно-технической конференции. – М.: Грифон. – 2016. - С. 88-90.

20. Глотов В.В. Структура зонда сканера ближнего поля / Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ. – Воронеж. - Издательство ФГБОУ ВО «ВГТУ». – 2016. - С.136.

21. Глотов В.В. Моделирование печатной платы с использованием электрической дипольной модели / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Математическое и компьютерное моделирование, информационные технологии управления: сборник трудов школы для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Воронеж. - Издательство «Научная книга». - 2016. – С. 69-71.

22. Глотов В.В. Оптимизация радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Физика. Технологии. Инновации - 2017: сборник трудов IV Международной молодежной научной конференции. - г. Екатеринбург. – УРФУ. - Секция 1. - С. 119-121.

23. Глотов В.В. Определение оптимизации с помощью генетических алгоритмов / В.В. Глотов, М.А. Ромащенко // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы IV-й международной научно-практической конференции. – Тамбов. - Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ». - 2017. – Т. 1. - С. 87-90.

24. Глотов В.В. Сканер ближнего электромагнитного поля для двусторонних и многослойных печатных плат / Глотов В.В. Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Глотова Т.С., Сапрыкин И.И., Ромащенко М.А. // В сборнике: Научная опора Воронежской области. Сборник трудов

победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2019. С. 376-378

25. Глотов В.В. Построение карт напряженности радиатора с помощью дипольной модели / Глотов В.В. Глотова Т.С., Иваницкий А.С. // В сборнике: Научная опора Воронежской области. Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2020. С. 183-185.

26. Глотов В.В. Щуп сканера ближнего магнитного поля / Глотов В.В. Глотова Т.С., Иваницкий А.С. // В сборнике: Научная опора Воронежской области. Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж. - 2021. - С. 341-342.

*Патент на полезную модель и зарегистрированные программы для ЭВМ:*

27. Глотов В.В., Ромащенко М.А., Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Глотова Т.С. Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат. РОСПАТЕНТ. Правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - Патент на полезную модель. - №189820 от 05.06.2019 г.

28. Фёдоров С.М., Глотов В.В. Программа расчета зон приема сигнала с учетом помеховой обстановки. РОСПАТЕНТ. Правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - №2018618333 от 11.07.2018 г.

29. Глотов В.В. Программа сканера ближнего электромагнитного поля. РОСПАТЕНТ. Правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - №2018612831 от 01.03.2018 г.

30. Глотов В.В., Глотова Т.С., Ромащенко М.А. Программа для анализа ближнего электромагнитного поля печатных плат. РОСПАТЕНТ. Правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - №2019612102 от 29.01.2019 г.

31. Глотов В.В., Зубцов К.А., Глотова Т.С. Программа для анализа ближнего электромагнитного поля на внутриаппаратурном уровне. РОСПАТЕНТ. Правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - № 2022611295 от 24.01.2022 г.

Подписано в печать 09.02.2023

Формат 60 × 84/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,1. Тираж 70 экз. Заказ № 52

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84