

На правах рукописи

КУЛИКОВ ОЛЕГ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСИСТЕМЫ
АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРОЦЕССОВ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук



МОСКВА - 2013

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА ВО ВЛАДИМИРСКОМ ФИЛИАЛЕ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ПРИ
ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук, профессор
Шалумов Александр Славович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Увайсов Сайгид Увайсович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Московского института электроники и математики ФГАОУ ВПО "НИУ "Высшая школа экономики"

Малиничев Дмитрий Михайлович - кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Московский технический университет связи и информатики», доцент кафедры «Защита информации и техника почтовой связи»

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Защита состоится "24" января 2013 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 217.047.01 во ФГУП "Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования" по адресу: 105187, Москва, ул. Кирпичная д.39-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП "Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования"

Автореферат разослан "21" ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 217.047.01
доктор технических наук



Варламов О.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных методов защиты электронной аппаратуры (ЭА) от воздействия внешнего электромагнитного поля и обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) является экранирование. С необходимостью разработки эффективных конструкций (экранов) для защиты аппаратуры от внешних электромагнитных воздействий или для снижения уровня помех сталкивается практически любой инженер-конструктор. Теория электромагнитного экранирования начинает свою историю с середины двадцатого века, однако в большинстве случаев инженерные оценки эффективности экранирования той или иной конструкции основываются на приближенных соотношениях, а принимаемые проектные решения в основном базируются на опыте, чем на научно обоснованных расчетах.

В течении последних десятилетий внимание разработчиков ЭА к вопросам экранирования существенно возросло. Это вызвано следующими основными причинами:

- процессы глобализации приводят к расширению зон действия международных, региональных и национальных стандартов и требований в области ЭМС, ужесточение санкций за их нарушение заставляет компании-производители уделять больше внимания вопросам обеспечения ЭМС своей продукции, среди которых на одной из ведущих позиций находится экранирование;
- существенно расширился диапазон частот внешних электромагнитных полей, воздействию которых подвергается электронная аппаратура. На стадии создания теории экранирования частоты, представлявшие интерес для инженеров, лежали в области низких частот, то сейчас этот диапазон занимает десятки гигагерц. Следовательно, традиционные методы расчета электромагнитных экранов требуют серьезного пересмотра;
- отказы, связанные с недостаточной эффективностью экранирования ЭА, выявляются лишь на завершающих этапах разработки и приводят к длительной оптимизации конструкции, что в конечном итоге сказывается на сроках и стоимости выполнения проектных работ, поэтому проектные подразделения стремятся изыскать способы сокращения издержки, которые возникают при эмпирическом подходе к проектированию;
- специалистами по информационной безопасности уделяется большое внимание вопросам экранирования. С точки зрения информационной безопасности, экран должен предотвращать несанкционированный доступ к информации путем многократного снижения интенсивности излученного от аппаратуры электромагнитного поля; с другой стороны, аппаратуру обработки информации необходимо защищать от преднамеренных мощных электромагнитных воздействий. Кроме информационной безопасности, экранирование электромагнитного поля востребовано в медицинской технике, а так же в научных исследованиях.

Таким образом, на сегодняшний день наблюдается большая потребность в данных об эффективности экранирования конструкций ЭА со стороны широкого круга специалистов. Такие данные можно получить двумя путями: путем натурных испытаний опытного образца или путем компьютерного моделирования электромагнитных процессов.

Натурные испытания требуют больших материальных и временных затрат, что в условиях ужесточающихся требований по срокам выхода нового продукта на рынок является нежелательным. Тем более, что по результатам испытаний в конструкцию

приходится вносить дополнительные изменения, которые в свою очередь, тоже требуют значительных затрат времени и средств.

Компьютерное моделирование для определения эффективности экранирования в настоящее время в отечественной промышленности практически не применяется. Это связано с тем, что существующие специализированные программы электромагнитного моделирования (CAE-системы) довольно сложны в освоении, требуют от пользователя глубоких теоретических познаний и имеют высокую стоимость. Однако, широкое применение компьютерного моделирования для определения эффективности экранирования позволило бы сократить количество промежуточных вариантов конструкции ЭА, сроки и затраты на проектирование.

В настоящее время на рынке представлено большое количество программ для расчета электромагнитных полей. Наиболее популярными из них являются универсальные CAE-системы: ANSYS, CST STUDIO SUITE, Ansoft HFSS, ANSYS, Remcom XFDTD и др.

Компьютерное моделирование для определения эффективности экранирования электронной аппаратуры, в общем случае, заключается в следующем:

- 1) нахождение напряженностей электрического и магнитного полей во множестве точек в счетной области, включающей в себя корпус блока ЭА и окружающее его пространство при заданных параметрах воздействия;
- 2) вычисление эффективности экранирования корпуса блока ЭА по известным формулам:

$$S_E = 20 \lg \frac{E_0}{E_s}, \quad S_M = 20 \lg \frac{H_0}{H_s},$$

где S_E, S_H - эффективности экранирования электрического и магнитного полей, дБ; E_0, E_s - напряженности электрического поля снаружи и внутри исследуемого корпуса; H_0, H_s - напряженности магнитного поля снаружи и внутри исследуемого корпуса.

В большинстве случаев экран является одновременно и несущей металлической конструкцией, проектированием которой зачастую занимаются специалисты, не имеющие достаточной подготовки в области электро- и радиотехники. Подготовка разработчика электронной аппаратуры, сочетающего в себе знания конструктора, аналитика-расчетчика и пользователя CAE-системы, требует значительных временных и финансовых затрат, что, учитывая динамику темпов производства и нестабильность кадров в современных условиях, неэффективно. Однако даже наличие высококвалифицированного разработчика не эффективно решает проблему расчета эффективности экранирования. Использование компьютерного моделирования требует от разработчика ЭА построить расчетную модель конструкции, провести сбор входных данных, осуществить ввод этих данных, создать макрос для передачи в решатель CAE-системы, произвести расчет, обработать результаты и принять решение по полученным результатам. Таким образом, время, потраченное на моделирование изделия, может превышать время, отводимое на проектирование.

Поэтому полноценное использование всех возможностей существующих универсальных CAE-систем электромагнитного моделирования в практике конструирования экранов на отечественных предприятиях представляется трудновыполнимым.

Задачи моделирования электродинамических процессов и разработки методик экранирования ЭА рассматривались в работах Князева А.Д., Полонского Н.Б., Кечиева Л.Н., Шалумова А.С., Свонсона Д.Г. (Swanson D.G.), Гоншорека К.Х. (Gonschorek

К.Н.), Воршевского А.А., Гальперина В.В., Уильямса Т. (Williams Т.) и др. Указанными авторами внесен значительный вклад в теорию и практику экранирования ЭА и математического моделирования электромагнитных процессов в ЭА. Однако в данных работах отсутствует описание средств автоматизации расчетов эффективности экранирования, позволяющих в минимальные сроки и с минимальными затратами проводить расчет напряженности поля в конструкции и принимать решение об обеспечении эффективности экранирования. Кроме того, отсутствуют методы и алгоритмы расчёта эффективности экранирования конструкций ЭА произвольной геометрической конфигурации.

Таким образом, для создания конкурентоспособной и высоконадежной ЭА актуальной проблемой является решение задач автоматизированного анализа и обеспечения эффективности экранирования на основе комплексного моделирования электромагнитных процессов, как на программном, так и на методическом уровнях.

Цель и задачи работы. Целью работы является повышение эффективности процесса проектирования электронной аппаратуры, сокращение сроков и стоимости ее создания за счет применения средств автоматизации компьютерного моделирования электромагнитных процессов в конструкциях ЭА и оценки эффективности экранирования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- Исследование численных методов решения задач электродинамики с целью определения наиболее подходящего для моделирования электромагнитных процессов в ЭА при воздействиях внешних электромагнитных полей;
- Исследование существующих на сегодняшний день программ и программных комплексов, которые реализуют численные методы решения задач электродинамики;
- Разработка методики и алгоритма автоматизированного синтеза моделей для расчета эффективности экранирования.
- Практическая реализация разработанных методики и алгоритмов в виде автоматизированной подсистемы анализа и обеспечения эффективности экранирования электронной аппаратуры на основе численного моделирования электромагнитных процессов, включающая в себя:
 - разработку интерфейса пользователя, который обеспечивает ввод пользователем трехмерной типовой и произвольной конструкции ЭА в интерактивном режиме;
 - разработку графического постпроцессора, обеспечивающего вывод результатов моделирования в удобном пользователю виде;
 - разработку системы обмена данными между интерфейсом пользователя, решателем и постпроцессором;
 - разработку справочной базы данных по электромагнитным параметрам различных конструкционных материалов ЭА.
- Разработка методики анализа и обеспечения эффективности экранирования конструкций ЭА на основе численного моделирования электромагнитных процессов.
- Внедрение разработанного программного и методического обеспечения в практику проектирования на промышленных предприятиях и в учебный процесс вузов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач используются принципы системного подхода, теория электромагнитного поля, численные методы решения задач электродинамики, методы компьютерной графики и объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна работы. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие новые научные результаты:

1) разработан алгоритм преобразования трехмерной модели из конструкторской документации в модель, пригодную для расчета методом конечных элементов, отличающийся от существующих учетом особенностей генерации сетки конечных элементов, а также учетом инженерных методик проектирования электромагнитных экранов;

2) разработана методика автоматизированного синтеза модели ЭА для расчета эффективности экранирования, отличающаяся от существующих учетом специфики проектирования ЭА и четкой последовательностью выполняемых шагов;

3) разработана структура САПР на основе автоматизированной подсистемы анализа и обеспечения эффективности экранирования электронной аппаратуры на основе численного моделирования электромагнитных процессов, отличающейся от существующих систем электромагнитного моделирования интегрированием в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций ЭА и высокой степенью автоматизации, не требующей от пользователя специальных знаний в области электродинамики;

4) разработана методика анализа и обеспечения эффективности экранирования конструкций ЭА на основе численного моделирования электромагнитных процессов, отличающаяся от существующих применением разработанных методического и программного обеспечения.

Практическая ценность работы состоит в том, что использование созданных методических и программных средств позволяет повысить эффективность, а также сократить сроки и стоимость ранних этапов проектирования ЭА.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 18 научных работ, в том числе 5 статей, 4 (четыре) из них в журналах из перечня ВАК РФ.

Апробация диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: научно-практической конференции «Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий» (г.Москва, 2008г.), VII и VIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике» (г.Оренбург, 2008г., 2009г.), XV международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии. ИСТ-2009» (г.Нижний Новгород, 2009г.), IV межотраслевой конференции с международным участием аспирантов и молодых ученых «Вооружение. Технология. Безопасность. Управление» (г.Ковров, 2009г.), девятом международном симпозиуме «Интеллектуальные системы» (г.Москва, 2010), XV Международной конференции и Российской научной школе «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика - 2010)» (г. Москва, 2010г.), международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (г.Москва, 2010г.), XIV Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (г.Красноярск, 2010г.), конференции «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (г.Ульяновск, 2010г.), всероссийской научно-методической конференции «Повышение качества высшего профессионального образования» (г.Красноярск,

2010), Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (г.Санкт-Петербург, 2011).

Внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы (метод, алгоритмы, методика и программное обеспечение) внедрены в практику проектирования и производства ОАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева».

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Московского государственного института электроники и математики и используются при выполнении студентами специальности «Управление качеством» курсовых и дипломных работ.

Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 225 страницах машинописного текста, иллюстрируется 122 рисунками и 7 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 105 наименований и трех приложений.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, основные научные положения и результаты, а также практическая ценность и степень апробации работы.

В первой главе анализируется современное состояние проблемы и ставится задача исследования.

Проведен анализ проблемы электромагнитной совместимости электронной аппаратуры, дано обоснование ее актуальности, приведены примеры аварий и катастроф, вызванных электромагнитной несовместимостью.

Показано, что одним из основных методов обеспечения ЭМС электронной аппаратуры и защиты ее от электромагнитных воздействий является экранирование.

Описан общий подход к проектированию ЭА с учетом электромагнитных воздействий. Как показывает практика, на промышленных предприятиях проводятся лишь натурные испытания, которые требуют производства опытного образца. При неудовлетворительных результатах испытаний, приходится вносить изменения в конструкцию, заново выпускать опытный образец, и так до тех пор, пока не будет получен удовлетворительный результат. Такой процесс требует вложения больших денежных средств и затрат времени, что в результате сказывается на стоимости и сроках выхода продукта на рынок. Существует и известен альтернативный подход – использование компьютерного моделирования электромагнитных процессов в ЭА при воздействии внешнего поля, который позволяет сократить сроки и стоимость проектирования электронной аппаратуры. Однако, широкое применение компьютерного моделирования при расчетах эффективности экранирования конструкций ЭА сдерживается рядом факторов: 1) существующие универсальные САЕ-системы требуют много времени на освоение даже квалифицированными специалистами-расчетчиками (около 2-х лет); 2) время расчета эффективности экранирования типовой конструкции ЭА в универсальной САЕ-системе с учетом подготовки модели и анализа полученных результатов составляет от одной до трех недель, что является неприемлемым в условиях современного рынка.

Таким образом, для успешного применения компьютерного моделирования электромагнитных процессов для расчета эффективности экранирования при проектировании ЭА необходимо упростить процесс взаимодействия разработчика с САЕ-системой и автоматизировать процесс расчета.

Моделирование электромагнитных процессов в ЭА при воздействии внешних полей (облучении) строится на решении задач распространения электромагнитных волн в среде и на границах раздела сред. В настоящее время существует множество численных методов, позволяющих решать граничные задачи электродинамики. Наиболее популярными являются: метод моментов, метод конечных элементов, техника конечного интегрирования, метод конечных разностей во временной области, метод матриц линий передачи. В первой главе диссертации приведено их исследование с целью определения наиболее подходящего для решения поставленных в работе задач.

Исследование показало, что наиболее подходящим является метод конечных элементов (МКЭ). Смысл метода состоит в том, что пространство разбивается на простейшие элементы, имеющие форму тетраэдров. Размер тетраэдра должен быть достаточно мал для того, чтобы поле в его пределах можно было описать простой функцией или набором функций с неизвестными коэффициентами. Эти коэффициенты ищутся из уравнений Максвелла и граничных условий. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно этих коэффициентов.

Проведено описание программного обеспечения, применяемого для моделирования электромагнитных процессов. Отмечены достоинства универсальных программ, заключающиеся в возможности построения моделей любой степени сложности. Однако применение универсальных систем требует серьезных теоретических знаний и опыта использования данных программ. Кроме того, отсутствие специализированных баз данных по параметрам материалов конструкций ЭА увеличивает общее время расчета. Другим существенным недостатком универсальных программ является отсутствие средств расчета эффективности экранирования.

Выход из сложившейся ситуации лежит в разработке методического и программного обеспечения, позволяющего в короткие сроки и с минимальными усилиями проводить расчеты эффективности экранирования типовых и произвольных корпусов ЭА. Реализация методики предполагает создание пользовательских интерфейсов, автоматизирующих создание геометрических моделей, разработку специальных алгоритмов, преобразующих геометрические модели в конечноэлементные аналоги, которые позволили бы использовать универсальную САЕ-систему для проведения моделирования.

Во второй главе разрабатывается методика автоматизированного синтеза моделей для расчета эффективности экранирования ЭА.

Применяющаяся в сегодняшней технике ЭА представляет собой довольно сложные конструкции, состоящие из двух и более крышек, имеющих скругления, ребра, отверстия произвольной формы, проушины для крепления.

Такую модель очень проблематично использовать непосредственно для расчета, так как она содержит большое количество элементов, размер которых мал по сравнению с размером всей модели. Наличие таких элементов потребует огромного количества конечных элементов (порядка нескольких миллионов), что сделает невозможным расчет такой модели в приемлемые сроки на современных рабочих станциях. Поэтому перед инженером-расчетчиком стоит нетривиальная задача создания модели ЭА, пригодной для компьютерного моделирования, позволяющей с приемлемой точностью и в разумные сроки провести расчет эффективности экранирования. Такие модели не должны быть слишком детальными, а с другой стороны, не должны быть слишком упрощены, в этом случае результаты

моделирования и натурального эксперимента могут значительно (на порядок или больше) различаться.

На основе требований, предъявляемых к моделям ЭА различными системами компьютерного моделирования, был разработан алгоритм преобразования трехмерной модели из конструкторской документации в модель, пригодную для расчета методом конечных элементов (рисунок 1).

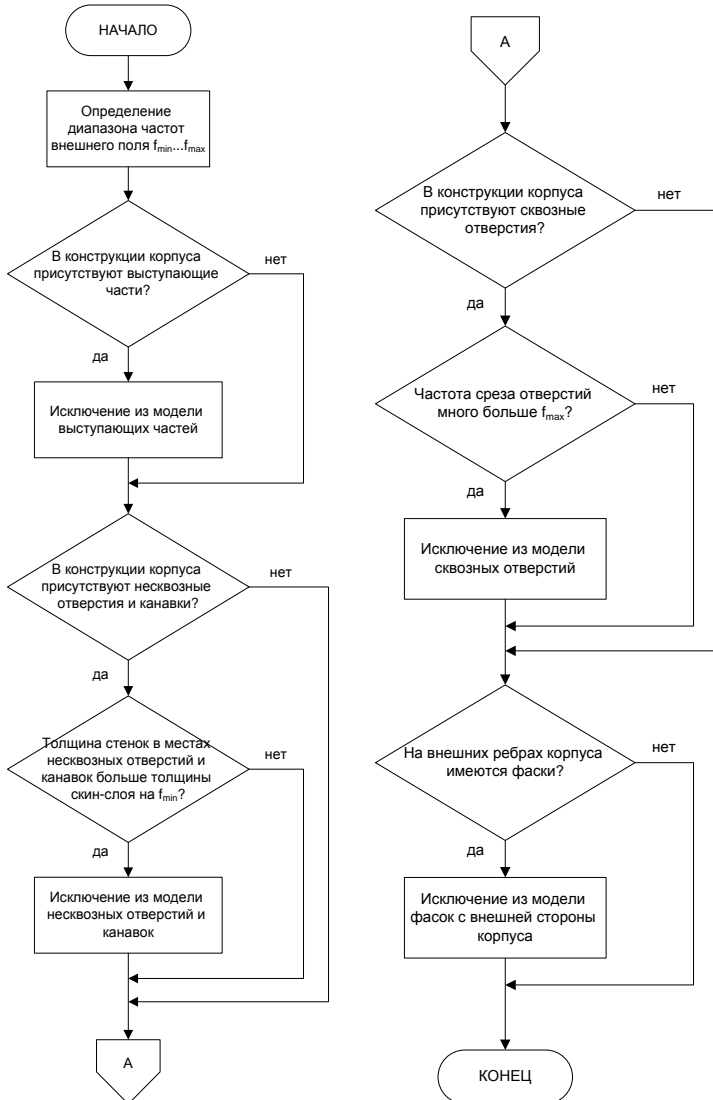


Рисунок 1 - Алгоритм создания модели корпуса ЭА, предназначенной для расчета эффективности экранирования электромагнитного поля методом конечных элементов

Первым шагом данного алгоритма является определение диапазона частот поля ($f_{\min} \dots f_{\max}$), воздействию которого будет подвергаться данный корпус. Диапазон частот воздействий при испытаниях на устойчивость к электромагнитному полю указан в соответствующих ГОСТ по ЭМС.

Вторым шагом является исключение из трехмерной модели корпуса выступающих частей. Такими частями обычно бывают ребра охлаждения, ручки для переноски, проушины для крепления и т.п. Выступающие части не оказывают влияния на поле внутри корпуса, поэтому их можно смело исключать из модели для уменьшения количества конечных элементов.

Третьим шагом является анализ сквозных отверстий и различных канавок на стенках корпуса. Если оставшаяся толщина стенки корпуса больше толщины скин-слоя (глубины проникновения поля в металл) на частоте f_{\min} , то данное отверстие можно исключить из модели. Толщина скин-слоя на частоте f считается по известной формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}},$$

где μ и σ - абсолютные магнитная и удельная проводимость металла.

Затем проводится анализ сквозных отверстий в стенках корпуса. Отверстие в металлической стенке представляет собой волноводный фильтр, с частотой среза, рассчитываемой по известным формулам:

$$f_{cp} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{D}, \text{ МГц},$$

$$f_{cp} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{W}, \text{ МГц}.$$

С помощью первой можно рассчитать частоту среза для круглого отверстия (D – диаметр отверстия), с помощью второй – для прямоугольного, где W – наибольший размер.

Если рассчитанная частота среза много больше, то отверстие можно исключить из модели, так как колебания с частотой, ниже частоты среза значительно ослабляются и практически не влияют на картину поля внутри корпуса.

Если на ребрах исследуемого корпуса имеются фаски, то в модели, предназначенной для электромагнитного анализа, их делать не стоит, так как это потребует дополнительного числа конечных элементов, что приведет к необоснованному увеличению времени расчета без существенного увеличения точности.

Далее во второй главе дается описание различных типов материалов (сред распространения электромагнитного поля) и их электрофизических свойств. Приведено описание различных граничных условий, используемых при решении граничных задач электродинамики, таких как идеальные электрическая и магнитная стенки, идеально согласованные слои. Рассматривается источник возбуждения счетной области – падающая плоская волна.

Описываются процесс и особенности дискретизации счетной области на конечные элементы. Делается вывод о том, что конечно-элементная сетка – это всегда компромисс между количеством конечных элементов в счетной области и ограниченностью памяти ЭВМ.

Общепринятая методика создания модели ЭА для расчета влияния электромагнитных воздействий состоит из следующих этапов:

1. Создание трехмерной твердотельной модели ЭА по алгоритму, приведенному на рисунке 1;
2. Назначение материалов деталям модели (задание тензоров $\hat{\varepsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$);
3. Назначение граничных условий на границах раздела сред, а также задание источников возбуждения структуры;
4. Дискретизация счетного пространства конечными элементами.

Каждый из этих этапов при ручном выполнении в универсальных программных комплексах электромагнитного моделирования занимает большое количество времени даже у подготовленных специалистов. Следовательно, необходимо максимально упростить и автоматизировать процесс синтеза модели, для того чтобы рядовой инженер-конструктор, не знакомый с тонкостями электродинамического моделирования, мог провести анализ эффективности экранирования электромагнитного поля корпусом ЭА, а также визуально оценить распределение электромагнитного поля внутри корпуса.

Конструктор взаимодействует с конечноэлементной САЕ-системой моделирования и САД-системой проектирования посредством понятного ему языка проектирования. Язык проектирования включает в себя входной и выходной языки. Входной язык делится на язык описания объектов моделирования и язык описания заданий. При помощи языка описания объектов моделирования осуществляется ввод модели конструкции в САД-систему, а язык описания заданий предназначен для задания параметров моделирования (диапазона частот, напряженности воздействующего поля, параметров сетки конечных элементов). Выходной язык используется для отображения результатов анализа электромагнитного процесса (графика зависимости эффективности экранирования от частоты, картин распределения поля внутри корпуса).

Данные, вводимые конструктором на входном языке проектирования в САД-систему, преобразуются с помощью программы-конвертора в данные, понятные программе-препроцессору САЕ-системы. После проведения расчетов САЕ-система формирует результаты, доступ к которым обеспечивается через встроенную программу-постпроцессор. Эти результаты преобразуются в данные, понятные проектировщику, для их анализа и принятия проектных решений.

Таким образом, обеспечивается полноценное взаимодействие конструктора с системами моделирования. Конструктор согласно данной схеме, не обладая знаниями, необходимыми для моделирования, управляет мощным математическим ядром САЕ-системы на доступном ему языке, что повышает эффективность процесса проектирования.

Программной реализацией рассмотренной выше схемы автоматизированного синтеза моделей электромагнитных процессов является разработанная в рамках диссертации подсистема ЭКРАН-ЭМС.

В третьей главе, согласно предложенной схеме моделирования и представленным во второй главе алгоритмам, описывается разработанная структура автоматизированной подсистемы анализа и обеспечения эффективности экранирования электронной аппаратуры на основе численного моделирования электромагнитных процессов.

На рисунке 2 представлена структурная схема разработанной САПР на основе автоматизированной подсистемы ЭКРАН-ЭМС. Подсистема состоит из препроцессора, обеспечивающего ввод типовых и произвольных конструкций, а также параметров расчета; расчетного ядра, реализующего метод конечных элементов; постпроцессора, обеспечивающего представление полученных результатов в удобном пользователю виде; редактора баз данных (БД),

обеспечивающего доступ пользователя к справочной БД; управляющей программы, которая координирует работу всех модулей подсистемы.

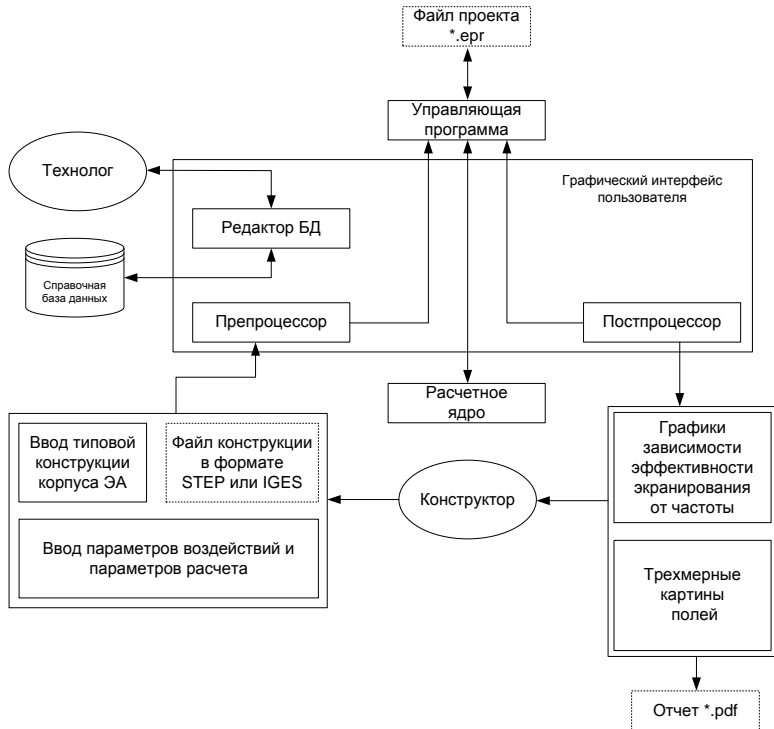


Рисунок 2 - Структурная схема САПР на основе подсистемы ЭКРАН-ЭМС

Препроцессор, постпроцессор и редактор БД составляют графический интерфейс пользователя подсистемы ЭКРАН-ЭМС, обеспечивая интерактивное взаимодействие пользователя с подсистемой.

САПР на основе подсистемы ЭКРАН-ЭМС работает следующим образом. Конструктор ЭА с помощью графического интерфейса осуществляет ввод в программу конструкции типового блока путем задания его геометрических размеров, либо импортирует файл конструкции корпуса в форматах IGES или STEP из сторонних САД-систем. Затем вводит параметры воздействий и параметры расчета в препроцессор. В результате проведения расчета конструктор получает трехмерные картины распределения напряженности полей в корпусе блока и окружающем пространстве, а также графики зависимости эффективности экранирования от частоты воздействующего излучения. В зависимости от полученных результатов, конструктор может внести изменения в конструкцию блока, а затем вновь провести расчет.

Технолог осуществляет ввод электрофизических параметров конструкционных материалов в справочную базу данных, откуда они поступают на вход управляющей программы.

Проведен анализ современных языков и сред программирования, который показал, что наиболее подходящий язык для выполнения поставленных задач по разработке подсистемы – C++, а среда программирования – Qt.

В третьей главе были проведены сравнительные тесты (сравнивалась скорость проведения расчета и соотношение полученных результатов с теоретическими) самых популярных расчетных ядер CST MWS, Ansoft HFSS и библиотеки EMTL, которые показали, что в качестве расчетного ядра предпочтительнее использовать Ansoft HFSS. Разработана схема взаимодействия расчетного ядра и графического интерфейса пользователя (рисунок 3).

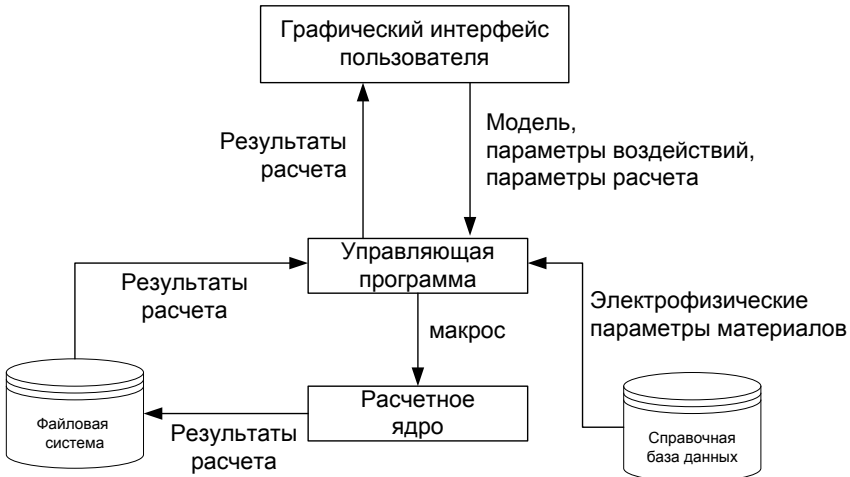


Рисунок 3 - Схема взаимодействия расчетного ядра и интерфейса пользователя

Управляющая программа получает в качестве входных данных модель исследуемого корпуса (типовой блок или импортированная модель) а также параметры воздействий и параметры расчета, заданные пользователем. На вход управляющей программы поступают также данные об электрофизических свойствах материалов конструкции, которые извлекаются из справочной базы данных.

На основании полученных входных данных управляющая программа осуществляет синтез специальной программы - макроса на языке высокого уровня VBScript. Синтезированный макрос подается на вход расчетного ядра и запускается на выполнение.

Следует отметить, что написание вручную макроса, по объему сопоставимого с автоматически синтезируемым (примерно тысяча строк кода), потребует от инженера-проектировщика недели упорного труда, даже при условии превосходного знания работы с программой Ansoft HFSS.

Результаты расчетов сохраняются программой-решателем в файловой системе персонального компьютера, на котором производился расчет, в директории проекта в виде текстовых файлов, содержащих пространственные координаты и значения напряженности электромагнитного поля. Управляющая программа производит чтение этих файлов, чтобы передать их графическому интерфейсу пользователя для отображения на трехмерной модели.

В ходе разработки постпроцессора был проведен сравнительный анализ существующих интерфейсов прикладного программирования (API) для выполнения визуализации в трехмерном пространстве конструкций и результатов расчетов. В ходе анализа было выявлено, что API OpenGL является наиболее подходящим для выполнения трехмерной визуализации в подсистеме анализа и обеспечения эффективности экранирования электронной аппаратуры.

В третьей главе приведено описание системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, используемой в общей базе данных (БД). Описывается реализация доступа к БД, содержащей электрофизические параметры используемых конструктивных материалов из разрабатываемой подсистемы.

На рисунке 4 представлено главное окно подсистемы ЭКРАН-ЭМС, результат расчета напряженности электрического поля внутри и снаружи модели нетипового корпуса ЭА, импортированного из САПР "КОМПАС-3D" через формат обмена проектными данными STEP, графики эффективности экранирования блоком электрического и магнитного поля в зависимости от частоты воздействия, рассчитанные с помощью подсистемы ЭКРАН-ЭМС.

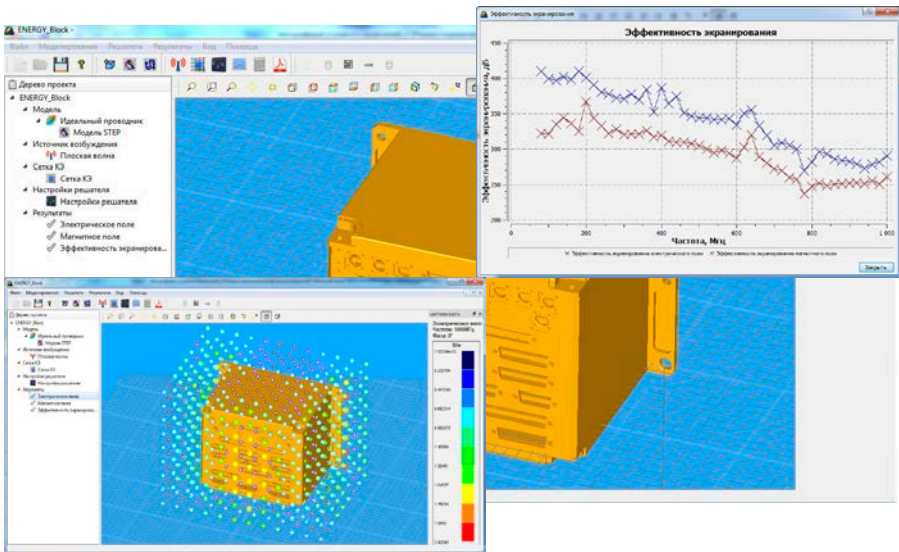


Рисунок 4 – Интерфейс подсистемы ЭКРАН-ЭМС: главное окно; результат расчета напряженности электрического поля; графики эффективности экранирования магнитного и электрического поля на частотах от 80 до 1000 МГц

В четвертой главе разработана методика синтеза и анализа проектных решений по анализу и обеспечению эффективности экранирования с применением автоматизированной подсистемы, разработанной в третьей главе.

Схема алгоритма разработанной методики приведена на рисунке 5.

Методика анализа и обеспечения эффективности экранирования конструкций ЭА включает в себя следующие этапы:

- создание проекта в подсистеме ЭКРАН-ЭМС;
- анализ конструкции ЭА;
- ввод параметров воздействий в подсистему ЭКРАН-ЭМС;

- настройка решателя и сетки конечных элементов (КЭ);
- расчет эффективности экранирования;
- в зависимости от полученных результатов, выявление проблемных участков конструкции и внесение необходимых изменений в конструкцию.

В четвёртой главе также приведён пример использования разработанной методики. На примере продемонстрированы малые временные затраты и относительная легкость процесса моделирования.

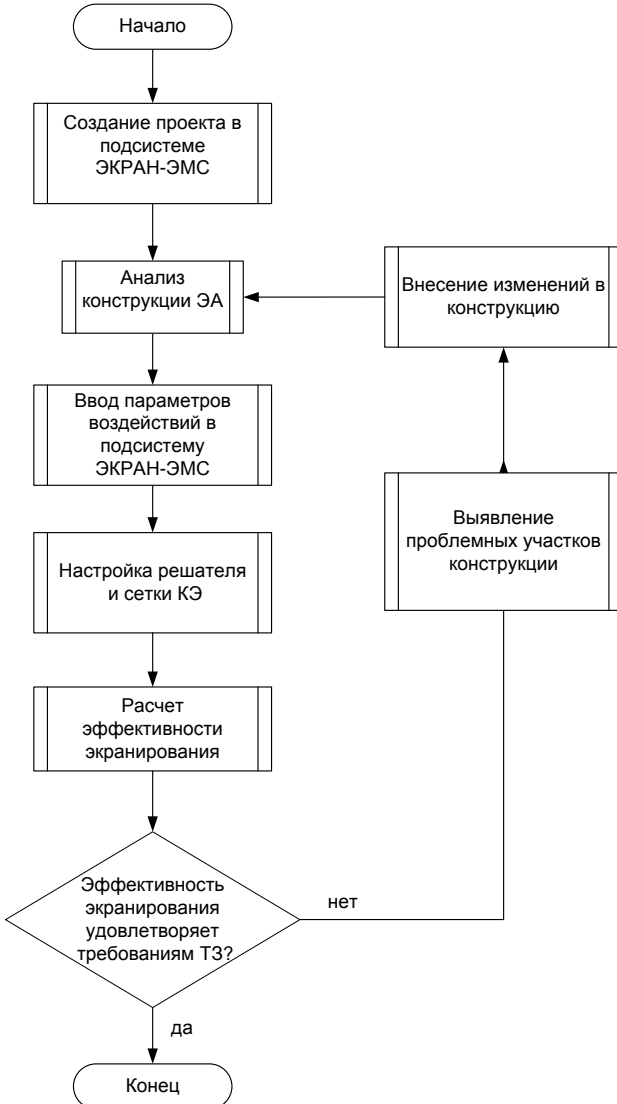


Рисунок 5 – Алгоритм методики анализа и обеспечения эффективности экранирования конструкций ЭА

В Приложении А приведены акты внедрения результатов диссертационной работы в практику проектирования и производства ОАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва», а также в учебный процесс Московского государственного института электроники и математики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные научные, теоретические и практические результаты работы состоят в следующем:

- разработана методика и алгоритм автоматизированного синтеза моделей для расчета влияния воздействия электромагнитных полей на ЭА, отличающихся от существующих учетом особенностей генерации сетки конечных элементов, а также учетом инженерных методик проектирования электромагнитных экранов, позволяющая сократить сроки создания конечно-элементной модели для расчета эффективности экранирования;
- выполнена практическая реализация разработанных методики и алгоритмов в виде автоматизированной подсистемы анализа и обеспечения эффективности экранирования электронной аппаратуры на основе численного моделирования электромагнитных процессов, отличающейся от существующих систем электромагнитного моделирования интегрированием в общий процесс автоматизированного проектирования конструкций ЭА и высокой степенью автоматизации, не требующей от пользователя специальных знаний в области электродинамики.
- разработана методика анализа и обеспечения эффективности экранирования конструкций ЭА на основе численного моделирования электродинамических процессов, отличающаяся от существующих применением разработанных методического и программного обеспечения;
- разработанное программное и методическое обеспечение внедрено в практику проектирования на промышленных предприятиях и в учебный процесс вузов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Обеспечение передачи цифровых данных по каналу RS-232 в условиях внешних электромагнитных помех // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. - №4(35). – С.27-31.
2. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Обеспечение электромагнитной совместимости на ранних стадиях проектирования радиоэлектронной аппаратуры: средства и методы реализации // Успехи современной радиоэлектроники. - 2011. - 1. - С.12-18.
3. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Куликов О.Е., Травкин Д.Н., Соловьев Д.Б., Першин Е.О. Динамическое моделирование сложных радиоэлектронных систем // Междисциплинарный научный журнал "Динамика сложных систем". - 2011, № 3, т. 5. - С.37-41.
4. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Разработка подсистемы АСОНИКА-ЭМС для численного моделирования проблем электромагнитной совместимости // НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. - 2011. - № 11. - С.79-95

В других изданиях:

5. Шалумов А.С., Куликов О.Е. Применение информационных технологий для проектирования радиоэлектронной аппаратуры, отвечающей санитарным требованиям в области электромагнитных излучений/ А.С. Шалумов, О.Е. Куликов // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: Материалы научно-практической конференции / Под. ред. В.Г. Домрачева, С.У. Увайсова. – М.: МИЭМ, 2008. – С. 279-281.

6. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Применение информационных технологий для обеспечения электромагнитной совместимости/ О.Е. Куликов, А.С. Шалумов //Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. Материалы VII всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ОГУ, 2008. – С. 260-261.

7. Шалумов А.С., Куликов О.Е. Обзор современных программных комплексов для расчета параметров электромагнитных полей // «Информационные системы и технологии. ИСТ-2009» / Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2009. - С.56-57.

8. Куликов О.Е. Анализ статического магнитного поля с помощью программного комплекса ANSYS./ О.Е. Куликов//Вооружение. Технология. Безопасность. Управление: Материалы IV межотраслевой конференции с международным участием аспирантов и молодых ученых. В 3ч.Ч.1. – Ковров: ГОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2009. – С.212-218.

9. Куликов О.Е. Компьютерное моделирование магнитного поля, создаваемого прибором/ О.Е. Куликов //Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. Материалы VIII всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – С. 330-331.

10. Шалумов А.С., Куликов О.Е. Компьютерное моделирование влияния отверстий и щелей в экране на качество электромагнитного экранирования [Электронный ресурс] —I электрон. опт. диск (CD-ROM), файл 04_2_1_с_204_224, с.223. – ISBN 978-5-9902087-1-1

11. Куликов О.Е. Влияние щелей в корпусе электронного прибора на защищенность от электромагнитного излучения. // Интеллектуальные системы: Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУСАКИ, 2010. – С.288-289.

12. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Проектирование электронной аппаратуры, стойкой к внешнему электромагнитному излучению // "Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика - 2010)" / Материалы XV Международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. - М.: Энергоатомиздат, 2010. - С.22 - 23.

13. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Методика обеспечения стойкости электронной аппаратуры к внешнему электромагнитному излучению // "Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий" / Материалы Международной научно-практической конференции. - М.: МИЭМ, 2010. - С.424 - 426.

14. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Методика проектирования бортового электронного оборудования с учетом электромагнитной совместимости // Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерал. конструктора ракет.-космич. систем академика М.Ф. Решетнева (10-12 нояб. 2010, г.Красноярск)

: в 2 ч. /под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2010. – Ч.1. – С.157 – 158.

15. Шалумов А.С., Куликов О.Е., Соколов А.Д., Соловьев Д.Б., Першин Е.О. Многокомпонентный программный комплекс АСОНИКА для анализа и обеспечения стойкости аппаратуры к внешним воздействующим факторам и надежности // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: сборник научных трудов. Седьмой выпуск. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – С.179 – 191.

16. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Маршрут проектирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости для использования в учебном процессе // Повышение качества высшего профессионального образования [Электронный ресурс]: материалы Всероссийской науч.-метод. конф. : в 2 ч. / отв. ред. С.А. Подлесный. – Электрон. дан. (16 Мб). – Красноярск : СФУ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Электрон. версия печ. публикации 2010. – ISBN 978-5-7638-2058-4

17. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Обеспечение электромагнитной совместимости на ранних стадиях проектирования радиоэлектронной аппаратуры: средства и методы реализации // "Виртуализация проектирования и испытаний электронной аппаратуры" / Труды ОАО "Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники" / под ред. О.Ю. Мартынова, А.С. Шалумова, Н.В. Малютина, Ю.Н. Кофанова. - М.: Издательство "Радиотехника", 2011. - С.12-18.

18. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Опыт применения CST Microwave Studio, Ansoft HFSS, и библиотеки EMTL для расчетов эффективности экранирования корпусов РЭА // 9-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды симпозиума. – СПб, 2011. – С.134-137.