

На правах рукописи

**Сафонов Андрей Александрович**

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ ИЗ  
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва  
2011

Работа выполнена на кафедре «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» Московского государственного института электроники и математики (технического университета)

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
Кечиев Леонид Николаевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
Кириллов Владимир Юрьевич

Доктор технических наук, профессор  
Саенко Владимир Степанович

Ведущая организация: ГОУ ВПО "Московский  
государственный институт  
радиотехники, электроники и  
автоматики (технический  
университет)".

Защита состоится «23» июня 2011 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.06 Московского государственного института электроники и математики (технического университета) по адресу:

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭМ.

Автореферат разослан " \_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета, к.т.н.,  
профессор



Н.Н. Грачев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертации**

Совместное существование радиослужб всех видов, использующих электромагнитный спектр для передачи информации, а также технических процессов и устройств, генерирующих электромагнитную энергию в качестве побочного продукта, создает проблему, известную как электромагнитная совместимость (ЭМС).

Проблемы ЭМС не ограничиваются созданием помех радиослужбами. Все большее значение приобретают проблемы, связанные с тем, что электронная аппаратура всех видов становится более восприимчивой к внешним электромагнитным помехам. Это явление становится все более заметным по двум причинам: во-первых, постоянно увеличивается распространение и взаимодействие электронных изделий во всех сферах повседневной жизни и, во-вторых, современное оборудование с микропроцессорами и пластмассовыми корпусами обладает, как правило, худшей устойчивостью к электромагнитным помехам. Восприимчивость к помехам сегодня является основной проблемой электронных устройств многих видов, особенно тех, для которых обеспечение нормального функционирования является жизненно важным по причинам, связанным с безопасностью или экономикой.

При сложившейся практике необходимые характеристики ЭМС могут быть получены различными конструкторскими и схемотехническими методами. Одним из вариантов конструкторских методов является экранирование. В последние десятилетия к вопросам экранирования внимание специалистов существенно возросло. Важно отметить, что экранирование будет во много раз дешевле, если его внедрять в самом начале, и наоборот - очень дорогим, в том случае, когда им занимаются уже перед тем, как выдвинуть продукт на рынок.

В России проблемам проектирования электродинамических экранов посвящены работы Князева А. Д., Михайлина Д.Ю., Кечиева Л. Н., Балюка Н.В., Чернушенко А.М., Апполонского С.М., Волина М.Л., Шапиро Д.Н. и др. Из исследований в этой области за рубежом можно выделить работы Т. Уильямса, Д. Уайта, Д. Отта, Д. Барнса, К. Тонга и др.

В виду экономических и конструктивных соображений часто предпочтение, например, для изготовления корпусов аппаратуры, шкафов и стоек, отдается стальным экранам. Преимущества стали теряются при экранировании цепей, критичных к вносимым потерям. Так, экранирование

печатного узла стальным экраном может привести к снижению скорости распространения сигнала в линиях передачи печатного монтажа из-за влияния магнитной составляющей на свойства среды. В общем случае применение стальных экранов ограничено большими потерями, вносимыми ими в экранируемую цепь. Необходимо так же отметить, что соотношение массы и прочностных характеристик при использовании стальных экранов в настоящее время не удовлетворяет современным требованиям при изготовлении высокотехнологических изделий.

В диссертационной работе рассматриваются возможные подходы к решению данной проблемы: предлагается улучшение существующих методик конструирования электромагнитных экранов за счет внедрения передовых технологий изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ).

### **Цель и задачи работы**

Основной целью диссертационной работы заключается в: изучении проблем, возникающих при проектировании электромагнитных экранов с требуемой эффективностью экранирования из ПКМ; разработке методик проектирования электромагнитных экранов из ПКМ; внедрении полученных результатов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Проведение анализа возможностей применения ПКМ для создания электромагнитных экранов.
- Проведение анализа методов расчета эффективности экранирования и факторов, приводящих к её ухудшению.
- Разработка алгоритма проектирования неоднородного экрана и реализация его в виде программного обеспечения.
- Проработка и опробирование методики получения экрана с заданными характеристиками за счет использования передовых композиционных материалов и реализация её в виде программного обеспечения.
- Внедрение разработанных методик и программного обеспечения в практику промышленного проектирования и в учебный процесс вуза.

### **На защиту выносятся:**

- Метод создания электромагнитных экранов с использованием перспективных полимерных композиционных материалов.
- Решения, направленные на разработку электромагнитных экранов с заданными свойствами за счет применения композиционных

материалов, свойства которых можно регулировать путем изменения состава этих материалов и применения технологии с регулируемыми параметрами.

- Методики, направленные на разработку электромагнитных экранов с требуемыми свойствами из композиционных материалов с необходимыми требуемыми свойствами.
- Методики, позволяющие регулировать параметры технологического процесса при изготовлении электромагнитного экрана из композиционных материалов.

**Научная новизна диссертации заключается** в разработке методик проектирования электромагнитных экранов с применением полимерных композиционных материалов, отличительной особенностью которых является применение комплексного подхода с использованием электрофизических и геометрических параметров конструкций.

#### **Практическая значимость работы состоит в следующем:**

Решение поставленных задач диссертационной работы проводилось с использованием передовых перспективных композиционных материалов и перспективных технологий изготовления изделий с требуемым комплексом свойств из этих материалов.

Разработанные в процессе исследований методики и программы позволяют разработчикам облегчить процесс создания электромагнитных экранов с требуемым комплексом свойств.

#### **Реализация и внедрение результатов работы**

Основные результаты работы внедрены и нашли практическое применение при разработке изделий в ООО «НТИЦ АпАТэК-Дубна», а также в учебном процессе Московского государственного института электроники и математики на кафедре “Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы”.

#### **Апробация работы**

Результаты представлялись и докладывались на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов в МИЭМ (г. Москва), в 2007, 2008, 2009, 2010 гг., Международной Инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения в 2008 и 2009 г.г. (г. Москва), на Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости ЭМС-2009 (г. Санкт-Петербург), на XIX Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (г. Москва), на Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии – НМТ-2010» (г.

Москва), на XIX Международной научно-технической конференции в 2010 г. (г. Обнинск), на American Society of Civil Engineers (ASCE) 6th International Engineering & Construction Conference (IECC'6) в 2010 г. (г. Каир).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано: 21 публикация, в том числе 2 в журналах, включенных в рекомендуемый список ВАК для публикации основных материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 129 страниц машинописного текста, 97 рисунков, 20 таблиц. Список цитируемой литературы включает 117 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследований, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Электромагнитное экранирование в обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) радиотехнической аппаратуры» рассматривается современное состояние проблемы ЭМС радиотехнической аппаратуры, проводится анализ методов и средств ее обеспечения. Показана динамика развития методов обеспечения экранирования в радиотехнической аппаратуре, проанализированы тенденции в выборе новых материалов и способов изготовления экранов.

Разработка новых радиоэкранирующих материалов ведет к поиску технических решений, которые позволяют обеспечить их высокие электрические показатели и хорошую технологичность. В авиакосмической промышленности развитие конструктивных и специальных материалов, наиболее полно отвечающих современным требованиям, стимулировало переход от однофазных изотропных материалов (конструкционные сплавы на основе алюминия, титана и др.), к разработке и использованию полимерных композиционных материалов. Примером использования ПКМ в радиоэлектронной аппаратуре является применение стеклопластиков для изготовления радиопрозрачных изделий. Основное назначение радиопрозрачных изделий из стеклопластиков – защита прямо-передающих антенных устройств различных радиотехнических комплексов от внешних воздействий: влаги, солнечной радиации, ветровых, динамических, температурных и других нагрузок. Для решения задач экранирования

целесообразно использовать ПКМ с применением электропроводящих волокон и связующего, в частности углеродных волокон, которые обладают высокой электропроводностью. В настоящее время композиционные материалы, армированные углеродными волокнами, приобретают все большее распространение в создании электромагнитных экранов. ПКМ с непрерывными углеродными волокнами (УПКМ) используют при создании материалов с регулируемыми электрофизическими свойствами. Это дает возможность использовать их в качестве полимерных магнетодиэлектрических и электропроводящих материалов в радиоэкранирующих и радиопоглощающих электромагнитную энергию радиодиапазона покрытиях и конструкциях. При этом ПКМ с использованием углеродных волокон обладают уникальными механическими свойствами, что предоставляет большие возможности при проектировании конструкций с высокими механическими показателями.

Данные тенденции обуславливают необходимость проведения исследований, направленных на использование перспективных ПКМ в области создания электромагнитных экранов.

Рассмотрено современное состояние технологий производства ПКМ. К выбору материалов и технологии изготовления изделий радиотехнического назначения предъявляются особые требования в плане получения точности геометрических размеров изделия, в частности толщины, и минимальной пористости материала в готовом изделии. Требования к точности толщины изделия могут определяться десятymi долями миллиметра и менее - в зависимости от частоты радиоволны. Результаты анализа рассмотренных технологий представлены в табл. 1. В этой таблице приведены данные, показывающие преимущества и недостатки технологий производства изделий из ПКМ.

*Таблица 1 – Сравнительный анализ технологий изготовления изделий из ПКМ*

	<b>Ручное формование</b>	<b>Инфузия/Инжекция</b>	<b>Препреговая технология</b>
<b>Преимущества</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Недорогие материалы</li> <li>• Минимальная стоимость оборудования</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Недорогие материалы</li> <li>• Улучшенное качество и повторяемость процесса</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низкая стоимость труда</li> <li>• Качество и повторяемость</li> <li>• «Чистый» процесс</li> </ul>
<b>Недостатки</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высокая стоимость труда</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Некоторый компромисс в выборе</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Стоимость материалов</li> <li>• Высокая</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низкий контроль качества</li> <li>• Вопросы труда и здоровья</li> <li>• Вопросы охраны окружающей среды</li> </ul>	<p>материалов</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Переменные свойства</li> <li>• Риск получения изделия с «выпадающими свойствами»</li> </ul>	<p>стоимость оборудования</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Место для хранения материалов</li> </ul>
--	---	--	---

Исходя из анализа приведенных данных, можно сказать, что наиболее приемлемым из технологических методов изготовления радиотехнической аппаратуры, удовлетворяющим перечисленным требованиям, является метод инфузии/инъекции.

Использование давления (избыточное – в случае инъекции; пониженное – вакуумирование – в случае инфузии) позволяет получать изделия из ПКМ с достаточно высокой степени воспроизводимыми характеристиками и геометрическими параметрами. Но при изготовлении изделий с использованием инъекции требуется наличие достаточно дорогого оборудования: мощные компрессоры, насосные станции, жесткие (в основном металлические) формы. Этот метод рекомендован для изготовления серийной или мелкосерийной продукции. В случае использования вакуумной инфузии требуется только: наличие простой формы (в основном стеклопластиковой), формирующей требуемую поверхность изделия; вакуумный насос; расходные материалы для создания системы пропитки и вакуумирования; материалы для создания вакуумного мешка. С использованием данного метода возможно изготовление различных по размерам изделий (площадью от нескольких сантиметров до сотен метров квадратных) и объемам – от одного изделия до серийного производства.

На основании изложенного в главе материала обоснована актуальность диссертационной работы, поставлены цель и задачи исследований.

**Во второй главе** «Анализ методов расчета эффективности экранирования электродинамических экранов» проанализированы методики расчета эффективности экранирования электродинамических экранов, выявлен ряд причин, которые приводят к существенному уменьшению эффективности экранирования экрана, разработан алгоритм проектирования неоднородного экрана, сформулированы выводы и рекомендации.

В данной главе приводится анализ методов расчета эффективности экранирования. В ряде случаев приведенные аналитические соотношения не дают ответа на частные конкретные вопросы, связанные с повышенными требованиями к точности расчетов. Поэтому в работе так же приведен алгоритм

и пример применения численных методов в расчете электрических и магнитных полей и оценке эффективности экранирования. Наибольшей универсальностью для расчета электрических и магнитных полей обладает метод конечных элементов (МКЭ). Применительно к экранированию с помощью МКЭ можно получать достаточно точные результаты при решении в процессе проектирования экранов задач для статических полей и решении задач в квазистатическом приближении. Благодаря универсальности метода расчеты можно делать для экранов сложной формы: с отверстиями; многослойных. На рис. 1 представлен пример расчета эффективности экранирования сферического экрана с отверстием в однородном магнитном поле (рисунок 1а) с помощью программы *ELCUT* (рис. 1б). В результате расчета из текстового файла значений магнитной индукции в программе *Microcal Origin* построен график распределения значений магнитной индукции вблизи экрана в плоскости *XYZ* (рис. 1в), где *XY* – геометрия экрана, *Z*- значения магнитной индукции.

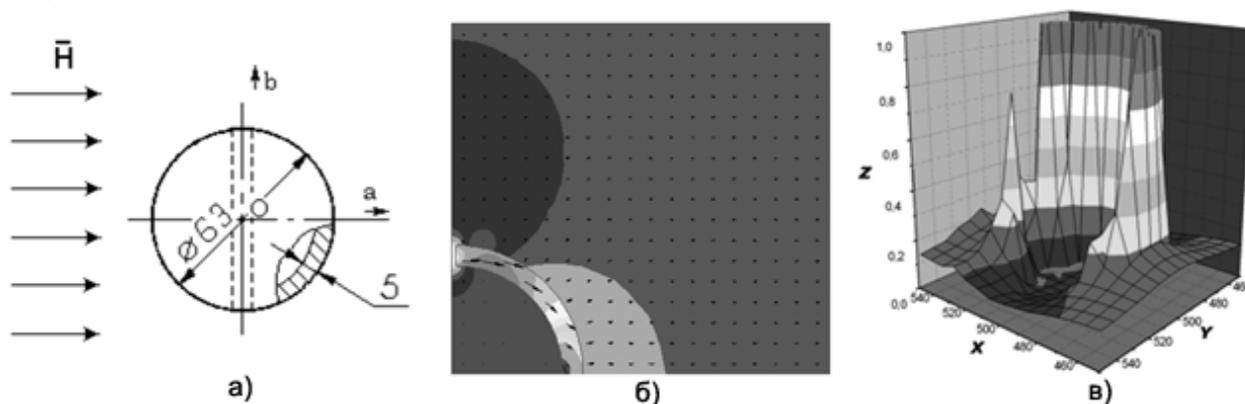
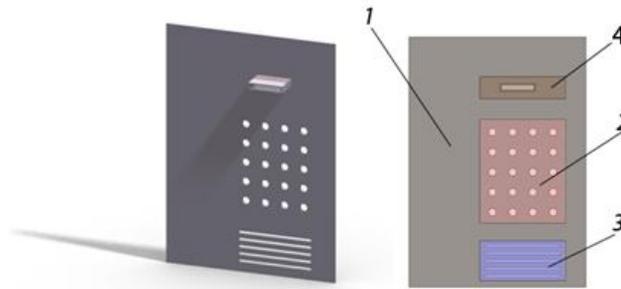


Рисунок 1 – Моделирование сферического экрана с отверстием в однородном магнитном поле с помощью программы *ELCUT*

Анализ методов расчета неоднородного экрана показал, что все утечки складываются вместе когерентно, и когерентно же их сумма складывается со значением эффективности экранирования. Это самый плохой случай, потому что фазы полей утечек могут быть как одинаковыми (когерентность на низких частотах), так и различаться случайным образом (не когерентны на высоких частотах). Обычно преобладающим является один или несколько путей утечек, и поэтому приемлемо пользоваться наихудшим когерентным случаем.

В качестве объекта исследования рассматривался неоднородный экран (изготовленный из композита на основе углеродного композиционного материала), представленный на рис. 2, расположенный в дальней зоне. Экран имеет четыре области: сплошной материал, область с регулярным расположением круглых отверстий, область с регулярным расположением прямоугольных отверстий, область прямоугольного волновода.



*Рисунок 2 - Неоднородный экран: 1- область сплошного листа, 2- область с круглыми отверстиями, 3 – область с прямоугольными отверстиями, 4- область прямоугольного волновода*

Проведенный расчет эффективности экранирования неоднородного экрана позволил сделать следующие рекомендации:

- Выбор материала – это только часть задачи конструирования экрана. Проникновение энергии через апертуры в большинстве случаев определяет эффективность экранирования в широком диапазоне частот;
- При наличии области экрана с малой эффективностью экранирования в широком диапазоне частот суммарная эффективность экранирования будет соответствовать эффективности экранирования этой области;
- Конструированию тех фрагментов, которые содержат апертуры, необходимо уделять особое внимание.

Учет этих особенностей при конструировании позволяет обеспечить целостность поверхности экрана, но это задача требует особенно выверенных решений.

**В третьей главе** «Теоретические исследования. Проектирование электромагнитных экранов с требуемой эффективностью экранирования из ПКМ» рассмотрены теоретические исследования в области проектирования электромагнитных экранов из ПКМ.

Как показывает практика, во многих случаях в результате выбора оптимального (с точки зрения требуемых защитных свойств) варианта сплошного корпуса-экрана, его стенки либо оказываются слишком тонкими для практического изготовления, либо следует использовать очень редкие материалы, свойства которых и стоимость не могут удовлетворять другим требованиям, предъявляемым к корпусам-экранам радиоэлектронных средств (РЭС) в целом. При этом необходимо учитывать наличие различных типов отверстий, крепёжных элементов, что сильно ухудшает эффективность экранирования. В результате большинство экранов являются не

оптимизированными. Экраны получаются значительно толще, чем это в действительности необходимо, а эффективность экранирования может быть меньше требуемой, к примеру, из-за неоптимального диаметра отверстия. Для оптимизации конструкции экрана, с точки зрения эффективности экранирования, необходимо применять при проектировании элементы CALS-технологий. Для этого требуется стандартизировать значения, получаемые с помощью аналитических формул расчета эффективности экранирования и передавать их в трехмерную модель экрана. Изменение значений входных параметров и получение оптимальных значений эффективности экранирования в расчетной программе влечёт за собой изменение реальных габаритных значений экрана и наоборот изменение габаритных данных при механической оптимизации конструкции ведет к пересчету значений эффективности экранирования. Схематическое изображение данного подхода представлено на рис. 3.

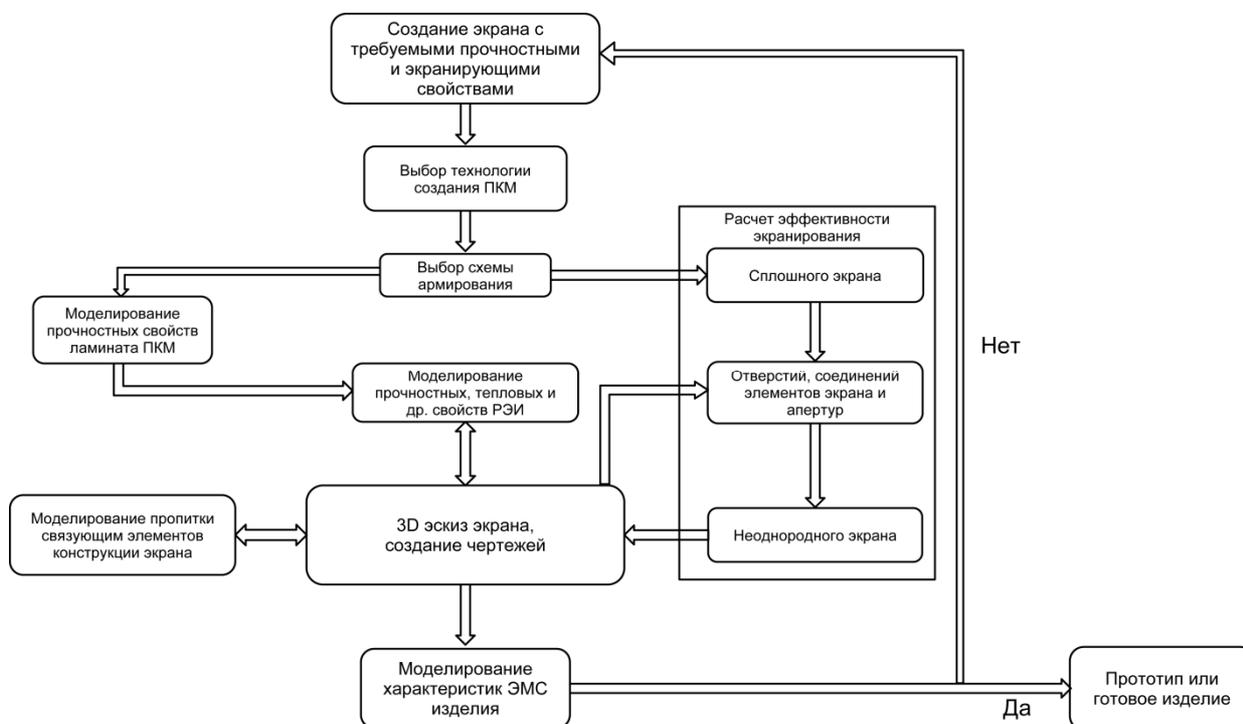


Рисунок 3 – Концепция описываемого подхода, использующего элементы CALS-технологий

В качестве базовой системы для расчета эффективности экранирования достаточным является использование методик, описанных в главе 2, или программы по расчету эффективности экранирования, рассмотренной в главе 4.

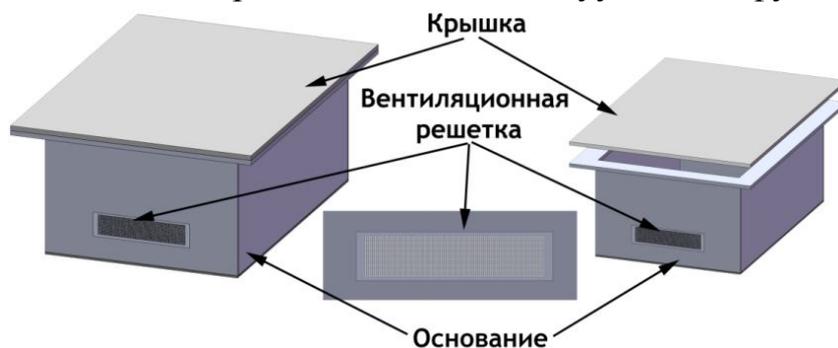
Для прогнозирования прочности конструкции необходимо использовать традиционные методы структурного анализа (например, метод конечных элементов). Такие методы позволяют точно прогнозировать эффективное или «среднее» напряжение и распределение деформации, которые появляются в композитной конструкции при механическом нагружении. При этом

предполагается, что в данных расчетах используется представление о ПКМ, как об однородном материале. Однако, по своей структуре, ПКМ является неоднородным материалом. Моделирование изделий на уровне слоев часто представляется неосуществимым на этапе проектирования и расчета многослойных композитных конструкций - из-за вычислительных и временных ограничений. Для получения приемлемых приближенных значений функции напряжения-деформации в отдельном слое по всей конструкции, и использование их в методике проведения реалистичной оценки разрушения, необходимо применять аналитические модели, анализ которых приведен в главе 1.

В данной работе используется аналитическая модель Чу, Карлеоне и Хсу для того, чтобы:

- Рассчитать эффективные (однородные) трехмерные напряженно-деформированные состояния, определяющие зависимости и механические свойства композитного материала, состоящего из произвольного количества ортотропных слоев;
- Рассчитать послойные трехмерные напряженно-деформированные состояния в композитном материале, подвергающемся трехмерному механическому нагружению;
- Спрогнозировать значения предела прочности ламината, основываясь на различных критериях разрушения слоев.

Рассмотрим процесс изготовления электромагнитного экрана из композиционных материалов (рис. 4) с интегрированным металлическим элементом вентиляционной решетки методом вакуумной инфузии.



*Рисунок 4 – Модель экрана*

Композиционный экран состоит из основания и крышки. В основание интегрирована вентиляционная решетка. Для прогнозирования параметров процесса вакуумной инфузии при изготовлении изделия был использован метод математического моделирования. Используя математическое моделирование процесса пропитки моделируем технологический процесс, при реализации которого эти части экрана можно пропитать с помощью метода вакуумной

инфузии в одном технологическом цикле. Важнейшей задачей при проектировании инфузионного процесса является разработка системы пропитки. Если изделие полностью не пропитается во время технологического процесса, то оно будет забраковано. При производстве это сопряжено с большими финансовыми и временными потерями.

Течение смолы (связующего) через армирующий наполнитель моделируется законом Дарси, который устанавливает линейное отношение между скоростью потока и градиентом прикладываемого давления. С учетом гравитационных сил, которые необходимо учитывать при моделировании вакуумной инфузии крупногабаритных изделий, закон Дарси и уравнение равновесия в трех мерной постановке записывается следующим образом:

$$\underline{u} = -\frac{K}{\mu}(\nabla p - \rho_r g), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0,$$

где  $\underline{u}$  - скорость потока,  $K$  - тензор проводимости,  $\mu$  - вязкость смолы,  $p$  - давление в смоле,  $\rho$  - плотность смолы,  $g$  - ускорение свободного падения,  $\nabla$  - градиент.

При решении задачи с использованием МКЭ область разбивается на конечные элементы. Для решения задачи о распространении фронта течения вокруг узлов конечно элементной сетки строятся контрольные объемы. Во время вычисления неустановившийся процесс течения связующего при вакуумной инфузии представляется в виде серии стационарных задач. На каждом временном шаге решается задача о распределении давления с использованием МКЭ.

Реализованный численный алгоритм по моделированию пропитки обладает следующими преимуществами:

- позволяет моделировать процесс пропитки любой геометрии и любого разбиения на конечные элементы;
- может моделировать впуск связующего точечными и линейными источниками;
- прогнозирует распределение давления, время и распространение фронта пропитки;
- реализовано в виде подпрограммы для расчетного комплекса *ANSYS*.

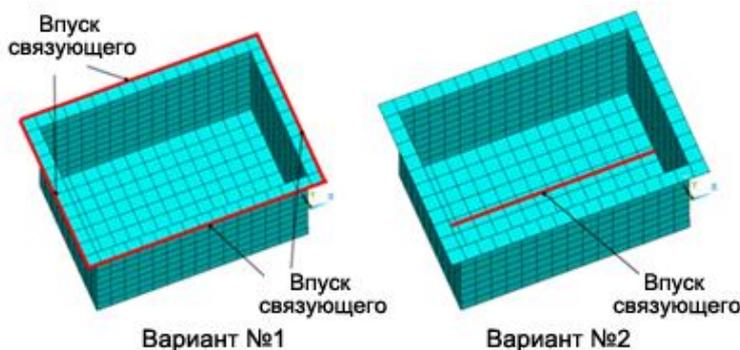
Рассмотрим задачу пропитки основания экрана. Для упрощения модели не учитывались элементы малых размеров. Модель была разбита на 650 конечных элементов. Использовались четырех - узловые конечные элементы. Давление в зоне впуска связующего  $P_{ex}=1$  атм. Давление вакуумирования  $P_{ex}=0$  атм. Параметр проводимости связующего через пакет наполнителя был

взят (исходя из экспериментальных данных лабораторного исследования, описанного в главе 4) равным  $K/Z=1020 \text{ мм}^2/\text{МПа}$ .

Рассматривалось два варианта пропитки:

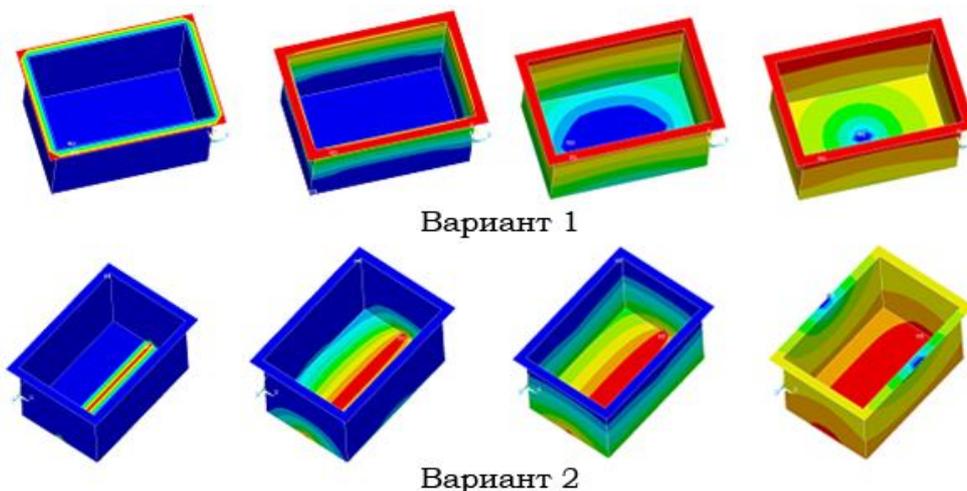
1. Линейный источник впуска связующего расположен по периметру верхней части изделия.
2. Линейный источник впуска связующего расположен на дне изделия.

На рис. 5 представлено расположение источников впуска связующего для рассматриваемых вариантов.



*Рисунок 5 – Расположение мест впуска связующего для основания без вентиляционной панели*

На рис. 6 представлены различные стадии пропитки изделия. На рисунках показано распространение фронта связующего в процессе пропитки под действием вакуума.

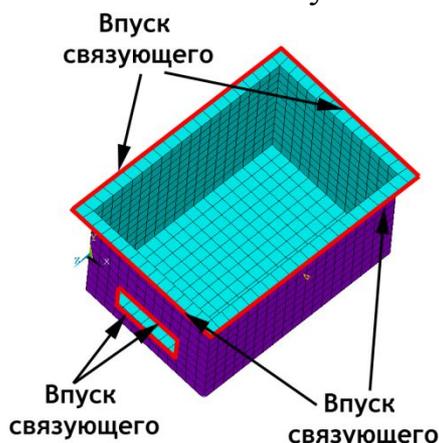


*Рисунок 6 Моделирование пропитки основания без вентиляционной панели*

Установлено, что во втором варианте время пропитки на 20% больше, чем в первом варианте.

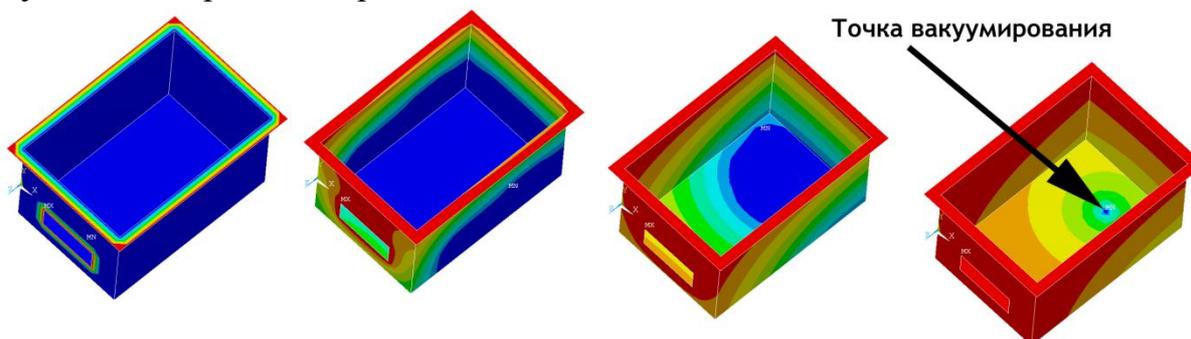
Интегрированная в конструкцию основания вентиляционная решетка существенно усложняет выбор расположения точки (или точек) подачи связующего и точки вакуумирования. Было проведено множество виртуальных технологических экспериментов для того, что бы выбрать оптимальную схему

расположения пропиточных каналов. На рисунке 7 представлен результат выбора оптимального расположения точек впуска связующего.



*Рисунок 7 – Расположение мест подачи связующего для основания с вентиляционной панелью*

На рис. 8 представлены различные стадии моделирования пропитки изделия. На этих рисунках показано изменение фронта прохождения связующего в процессе пропитки изделия.



*Рисунок 8 – Моделирование пропитки для основания с вентиляционной панелью*

В результате моделирования найдены оптимальные схемы расположения пропиточных каналов, точки подачи вакуума и подачи связующего, проведен прогноз продолжительности пропитки. Установлено, что при пропитке не должны образовываться непропитанные зоны. Таким образом, разработанный комплекс программ по моделированию процесса инфузии может быть применен для оптимизации технологического процесса пропитки под действием вакуума, например, элементов углепластикового композиционного электромагнитного экрана с интегрированными закладными деталями.

В третьей главе приводится процедура разработки методики проектирования соединений экранов. Электромагнитный экран обычно выполняется из нескольких панелей, соединенных вместе. Между соединяемыми панелями имеются швы, отличающиеся между собой различной структурой, относительно которой варьируются методики расчета эффективности экранирования. При контактировании двух сопрягаемых элементов конструкции экрана (рисунок 8) структуру шва определяют:

- отклонения формы реальных поверхностей от формы номинальной поверхности;
- расстояние между крепежными элементами;
- наличие или отсутствие прокладки.

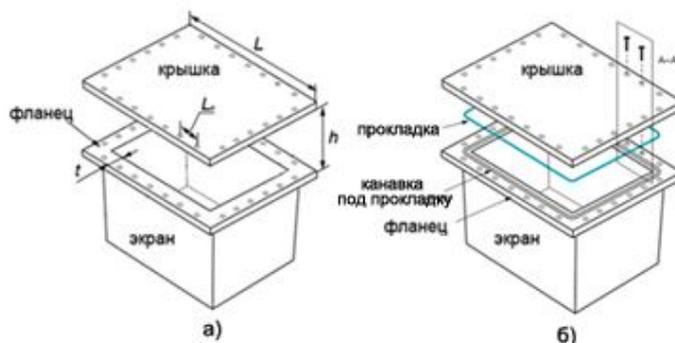


Рисунок 8 - Соединение частей экрана: а – без использования прокладки; б – с использованием эластомерной прокладки

При сближении двух однородных контактирующих поверхностей происходит внедрение самых больших выступов и сближение поверхностей - до контакта. При этом образуется нерегулярная система впадин и капилляров произвольной формы. Схематическая модель этой системы, учитывающая  $m$  сквозных и  $n$  поперечных каналов, образованных впадинами и капиллярами поверхности, приводится на рис. 9:

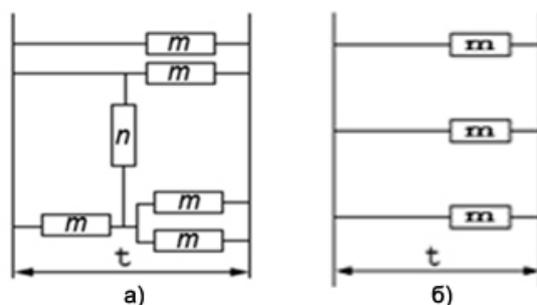


Рисунок 9 - Схематическая модель системы впадин и капилляров в контактирующих поверхностях в соединении с прокладкой ( $t$  – ширина фланца;  $m$  - схематическое изображение сквозных каналов)

Исходя из анализа аналитических методов расчета эффективности экранирования, приведенного в главе 2, формула по расчету эффективности экранирования в общем виде будет выглядеть так:

$$S_{ap} = 100 + 27,3 \frac{t}{L_0} - 20 * \lg(L_0 f) + 20 \lg \left( 1 + \ln \left( \frac{L_0}{h} \right) \right) - 10 \lg \left( 2 \left[ \frac{L}{L_0} \right] \right), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $L_0$  – расстояние между крепежными элементами, см;  $f$  - частота, МГц,  $h$  – высота щели, см;  $n$  – целое число;  $L$  – расстояние самой длинной стороны экрана.

Следовательно, для размещения крепежных элементов при соединении частей экрана без помощи прокладок можно сделать следующие рекомендации:

- Расстояние между крепежными элементами выбирается исходя из расчета эффективности экранирования.
- Требования к шероховатости поверхности не столь критичны в соединениях без использования прокладок.
- Ширина фланца  $t$  должна быть, как минимум, в пять раз больше высоты  $h$ , возникающей за счет шероховатости и неровности поверхности.

При проектировании соединений с прокладками необходимо пользоваться данными производителей по влиянию сжатия прокладки на эффективность экранирования. Был произведен анализ формул теории сопротивления материалов. Итоговая формула для любого сечения прокладки оптимального расстояния между точками крепления преобразована в следующий вид:

$$L_0 = \left[ \frac{5760 \Delta H E I E' I'}{(13F_1 + 2F_2)(EI + E' I')} \right]^{1/4}, \text{ см}, \quad (3)$$

где  $\Delta H$  – деформация сжатия прокладки, см;  $F_2$  – максимальная сила действующая на прокладку, Н/см;  $F_1$  – минимальное сила, действующая на прокладку, Н/см;  $L_0$  – расстояние между крепежными элементами, см;  $E$  – модуль эластичности материала экрана, кг/см<sup>2</sup>;  $I$  – момент инерции основания под прокладку, см<sup>4</sup>;  $E'$  – модуль эластичности прокладки, кг/см<sup>2</sup>;  $I'$  – момент инерции прокладки, см<sup>4</sup>.

**Четвертая глава** «Методики, средства и результаты экспериментальных исследований» посвящена внедрению разработок, сделанных на основе теоретических исследований, приведенных в предыдущих главах.

На основании проведенного анализа существующих аналитических формул для расчета эффективности экранирования была разработана программа по расчету эффективности экранирования неоднородного экрана *SE Calculator* (рис. 10). Программа разработана в среде *Microsoft Visual Basic 2010* для операционной системы *Windows Vista*. Для расчета эффективности экранирования неоднородного экрана используется методика, описанная в главе 2. Пользователь может подобрать оптимальные значения параметров экрана. Программа имеет простой интерфейс, обеспечивает высокую точность расчета, внедрена в учебный процесс ГОУВПО МИЭМ и может использоваться в процессе создания электродинамических экранов.

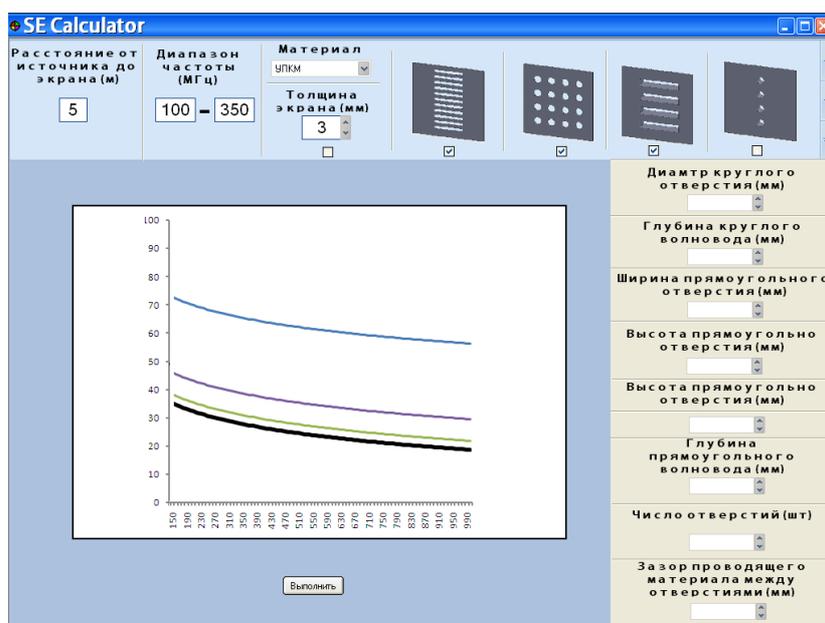


Рисунок 10 Ввод, изменение параметров и отображение результатов в программе SE Calculator

Описанная в данной работе методика создания оптимизированного с точки зрения прочностных и экранируемых свойств композиционного материала была модифицирована в удобную для пользователя программу Composite (рис. 11). Программа разработана в среде *Microsoft Visual Basic 2010*. Программа разработана для операционной системы *Windows Vista*. Таким образом, пользователь может подобрать оптимальные значения параметров композита. Программа имеет простой интерфейс, обеспечивает высокую точность расчета, может применяться в инженерной практике и при обучении специалистов.

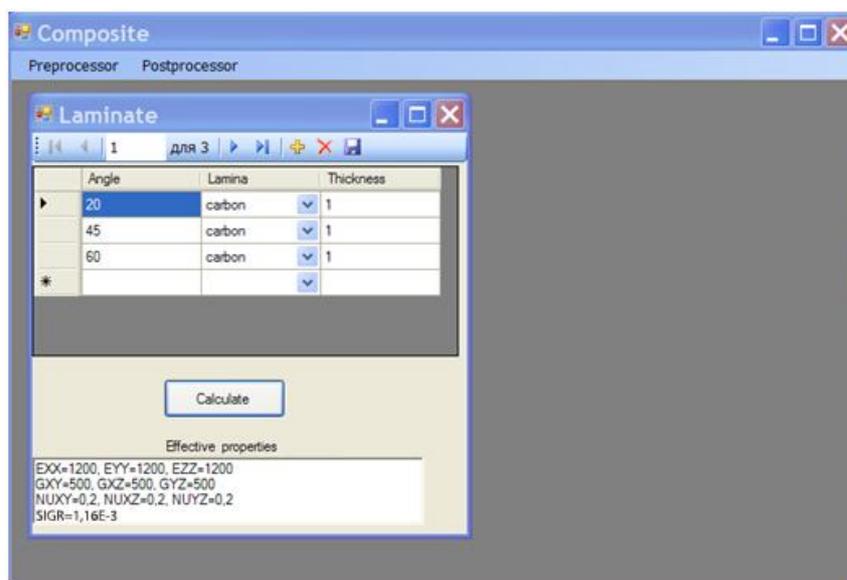
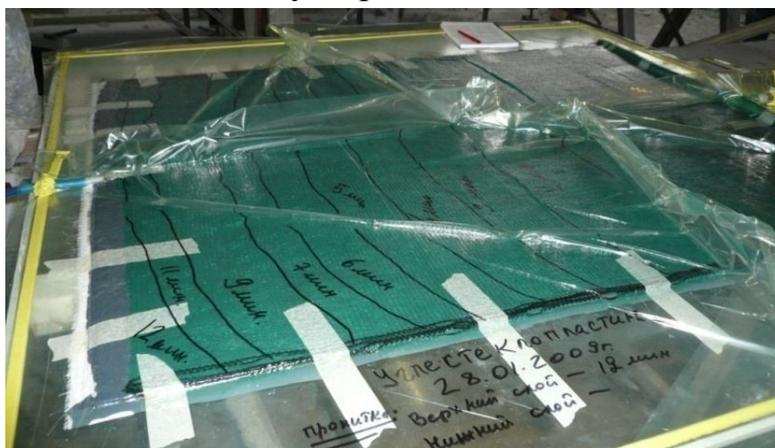


Рисунок 11 – Расчет эффективных свойств ламината в программе Composite

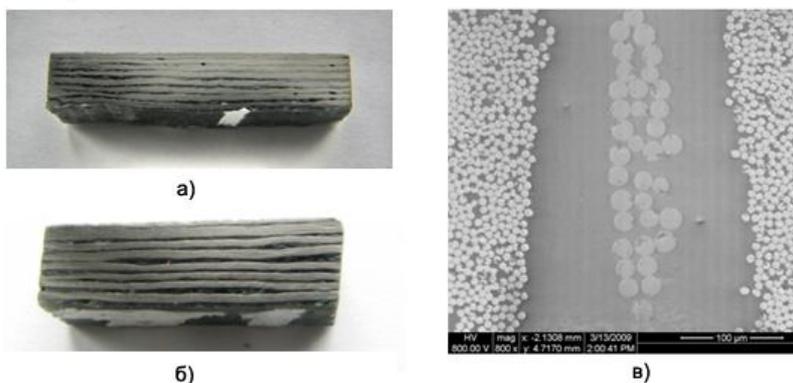
Произведены экспериментальные исследования, направленные на уточнение характеристик ПКМ и получение данных для разработки методики

математического моделирования процесса вакуумной инфузии (рис. 12) и изучении влияния схемы армирования на эффективность экранирования. Для этого был проведен эксперимент по пропитке методом вакуумной инфузии образца плиты толщиной 8 мм из углеродного наполнителя.



*Рисунок 12 – Процесс вакуумной инфузии*

Для оценки качества пропитки было проведено исследование макро и микроструктуры полученного композита. Был отрезан образец размером 25x25x6 мм от плиты. Для исследования образца плиты изготовлено два микрошлифа (рис. 13 а, б). Исследовали микрошлифы с использованием светового микроскопа отражённого света и растрового электронного - при увеличениях от нескольких десятков до нескольких тысяч крат. Типичный фотоснимок структуры исследуемых плит, представленный обоими типами слоёв, приведен на рис. 13в.



*Рисунок 13 - Исследование макро и микроструктуры УПКМ*

С использованием графического метода было получено, что средняя пористость не превосходит 2%. Среднее объемное наполнение углеродным наполнителем - в районе 65%, что подтверждает результаты анализа, приведенного в главе 1.

Для математической модели моделирования пропитки методом вакуумной инфузии средняя величина проницаемости в плоскости армирования оценивалась по формуле

$$\frac{K}{\mu} = \frac{L^2}{2\Delta p T}, \quad (4)$$

где  $\Delta p$  - разница давлений;  $L$  - расстояние пройденное фронтом пропитки;  $T$  - время пропитки.

Для проведенного эксперимента

$$\frac{K}{\mu} = \frac{L^2}{2\Delta p t} = \frac{1300^2}{2 \cdot 0.92 \cdot 900} = 1020 \frac{\text{мм}^2}{\text{атм} \cdot \text{с}}.$$

Пропитка по толщине оценивается аналогичным соотношением

$$\frac{K}{\mu} = \frac{H^2}{2\Delta p t}, \quad (5)$$

где  $H$  - толщина слоя;  $t$  - время пропитки по толщине в зоне впуска связующего. Для эксперимента №1  $t$  составляет 140 с

Для проведенного эксперимента

$$\frac{K_3}{\mu} = \frac{H^2}{2\Delta p t} = \frac{6^2}{2 \cdot 0.92 \cdot 140} = 0.14 \frac{\text{мм}^2}{\text{атм} \cdot \text{с}}.$$

Для изучения влияния схемы армирования ПКМ на эффективность экранирования было проведено экспериментальное исследование. В ходе экспериментального исследования были замерены значения напряжения  $U_1$  без экрана и с углеродным экраном схемы армирования  $U_{2[0^\circ, 0^\circ]}$  и  $U_{2[0^\circ, 90^\circ]}$  в зависимости от частоты: с 1 МГц до 30 МГц. Схема стенда представлена на рис. 14.

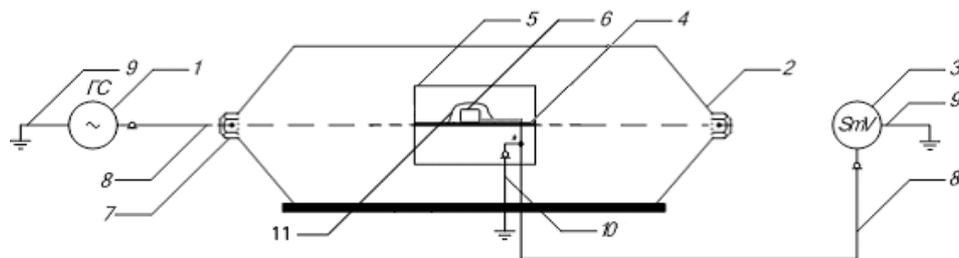


Рисунок 14 - Схема стенда для проведения исследований эффективности экранирования в зависимости от воздействий внешних электромагнитных помех в виде электрического поля: 1 – генератор сигналов высокочастотный Г4 – 102 (ГС); 2 – ТЕМ – камера; 3 – селективный микровольтметр SMV 11; 4 – центральный электрод ТЕМ – камеры; 5 – верхнее «окно» ТЕМ – камеры; 6 – имитатор корпуса электронного устройства, на который воздействует ЭМП (расположен на диэлектрической прокладке) в исследуемом экране и без него; 7 – разъём ТЕМ – камеры для присоединения ГС; 8 – соединительный коаксиальный кабель; 9 – соединение с заземляющим; 11 – углеродным пакет экранирующего материала

На рис. 15 приведен результат исследования в виде частотной диаграммы эффективности экранирования исследуемых образцов.

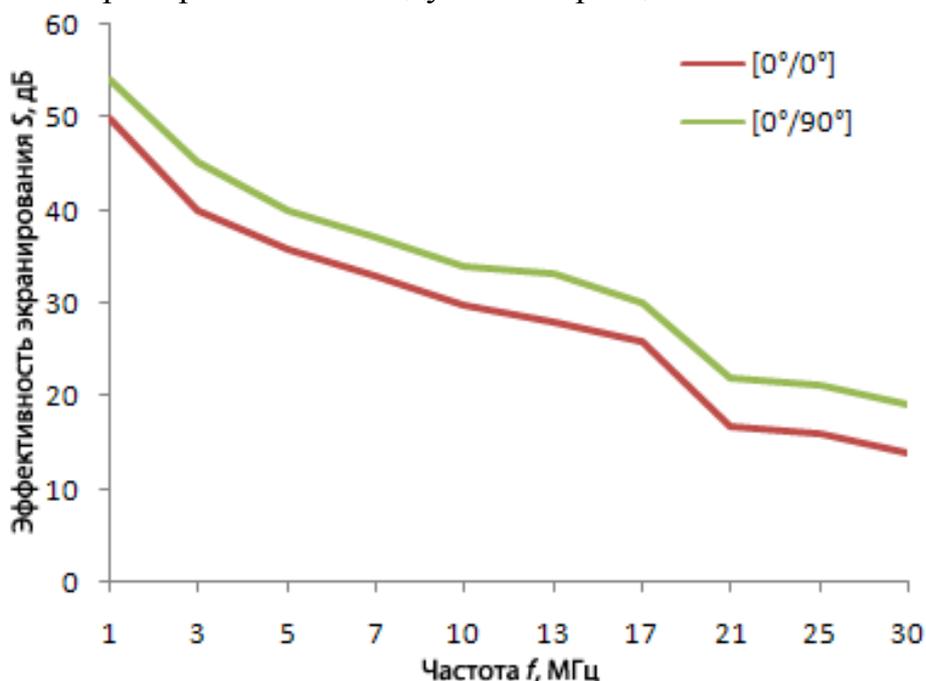


Рисунок 15 - Частотная диаграмма эффективности экранирования

Как видно из результатов исследования, схема армирования материала влияет на эффективность экранирования в пределах 10%. Наиболее предпочтительной схемой является однонаправленное армирование.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основным итогом диссертационной работы является решение актуальной задачи, заключающейся в разработке новых конструкций электромагнитных экранов с применением перспективных полимерных композиционных материалов и имеющей существенное значение для данной области знаний. При решении поставленной задачи в работе разработаны модели, методы расчета, научно обоснованные технические решения, которые позволили применить комплексный подход к проектированию электромагнитных экранов, оптимизированных с точки зрения экранируемых и прочностных свойств. Особенностью работы является ее прикладная направленность, позволяющая использовать полученные теоретические и экспериментальные результаты для решения конкретных научно-практических задач.

#### **Основные результаты работы:**

1. Разработана методика выбора оптимальных параметров (с точки зрения защитных и прочностных свойств) ПКМ. Приведены теоретические сведения о теории слоистого наполнителя и анализе повреждений, определены однородные свойства композитных материалов для структурного анализа, расчет эффективности экранирования ПКМ.

2. Разработана математическая модель процесса пропитки методом вакуумной инфузии, которая позволяет производить виртуальные технологические эксперименты для поиска оптимального способа пропитки изделия. Показан пример численного моделирования пропитки модели электромагнитного экрана с интегрированной вентиляционной решеткой.

3. Разработана методика проектирования механического соединения элементов экрана. Проведен анализ формул для расчета эффективности экранирования без использования прокладок и с использованием проводящих эластомерных прокладок. Приведенные формулы расчета и примеры расчетов позволили создать методологию выбора расстояния между крепежными элементами.

4. Разработан алгоритм выбора параметров неоднородного экрана под требуемую эффективность экранирования.

5. Проведена апробация и внедрение разработанных методик и программного обеспечения в практику промышленного проектирования и в учебный процесс вуза.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Сафонов А.А. Оценка эффективности экранирования сборных экранов электронной аппаратуры // Технологии ЭМС. 2009. №3 (30). С.
2. Сафонов Ан.А., Сафонов Ал.А. "Математическое моделирование технологического процесса изготовления углепластикового электромагнитного экрана методом вакуумной инфузии"// Технологии ЭМС. 2010. №3 (34). С 80-85
3. Сафонов А.А. Анализ влияния различных толщин стенок электромагнитного экрана с помощью МКЭ // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2007. – 321
4. Сафонов А.А. Программа расчета эффективности экранирования блока с фиксированными швами при воздействии электростатического разряда // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2008. – 290–291
5. Сафонов А.А. Изготовление углепластикового электромагнитного экрана методом вакуумной инфузии требуемой эффективности экранирования // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2010. – 246

6. Сафонов А.А. Использование метода моментов для оценки эффективности экранирования электромагнитного экрана с апертурами // Сборник докладов юбилейной XX Международной Интернет-ориентированной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2008) – М.: ИМАШ РАН, 2008 – 16
7. Сафонов А.А. Создание углестеклопластикового электромагнитного экрана методом вакуумной инфузии // Сборник докладов юбилейной XX Международной Интернет-ориентированной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2008) – М.: ИМАШ РАН, 2008 – 16
8. Сафонов А.А. Использование аналитических формул расчета эффективности экранирования при проектировании электромагнитных экранов в 3-D САПР программах // Сборник докладов ежегодной Международной Инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2009) – М.: ИМАШ РАН, 2009 – 155
9. Сафонов А.А. Выбор расстояния между крепежными элементами в соединениях электромагнитного экрана с эластомерными прокладками // Сборник докладов ежегодной Международной Инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2009) – М.: ИМАШ РАН, 2009 – 156
10. Сафонов А.А. Расчет интервала установки крепежных элементов для электромагнитного экрана // Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств» / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2008 – С. 115-122
11. Сафонов А.А. Композиционные экраны // Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств» / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2009 – С. 150-152
12. Сафонов А.А. Использование CALS-технологий при проектировании электромагнитных экранов требуемой эффективности экранирования // Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств» / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2010 – С. 93-99
13. Сафонов А.А. Современные подходы при проектировании электромагнитных экранов // Новые материалы и технологии – НМТ-2010. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 16-18 ноября 2010 г. – М.: ИЦ МАТИ, 2010 – С. 96-97

14. Сафонов Ан.А., Сафонов Ал.А. Создание углепластика для изучения влияния схемы армирования на экранирующие свойства // 8-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ ЭМС-2009, С. 111-112
15. Сафонов А.А., Томилин М.М. Подготовка к эксперименту по исследованию экранирующих свойств углепластика // Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств» / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2010 – С. 99-105
16. Сафонов Ан.А., Сафонов Ал.А. Разработка системы пропитки электромагнитного композиционного экрана с интегрированными элементами // Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств» / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2010 – С. 93-99
17. A.A. Safonov, S.N. Ozerov, Software for automated designing of composite ramps for the physically challenged people // American Society of Civil Engineers (ASCE) 6th International Engineering & Construction Conference (IECC'6) – Vol.2 – Cairo, Egypt, 186-189 p.
18. Сафонов А.А., Озеров С.Н. Автоматизированное проектирование и расчет себестоимости типовой конструкции из пултрузионных профилей пандусного схода для инвалидов // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. Тезисы докладов XIX Международной научно-технической конференции – С. 23-24
19. Сафонов А.А., Демский Д.В. Автоматизированная методика построения 3-D модели электромагнитного экрана с учетом требуемой эффективности экранирования // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Тезисы докладов. – М.: МИЭМ, 2009. – 196
20. Кечиев Л.Н., Сергеев А.А., Сафонов А.А. Применение МКЭ для расчета электромагнитного экрана // Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств» / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2006 – С. 150-152
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617918 "Расчет эффективности экранирования электромагнитных экранов (SE Calculator)", выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.