

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Комнатнова М.Е. «Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук (специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии, 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

Диссертационная работа М.Е.Комнатнова представлена на 216 страницах, в т.ч. приложение на 30 страниц, список литературы из 260 наименований, 15 таблиц и 107 рисунков. Автореферат объемом в 20 страниц адекватно отражает содержание диссертации.

Развитие технологий уплотнения монтажа электронных схем и постоянно растущие требования к компактности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов ставят в число первоочередных задачу обеспечения электромагнитной совместимости электронных узлов, блоков и систем.

До настоящего времени системно не решена задача экранирования РЭА с обеспечением высокой эффективности экранирования при минимизации соответствующих массовых показателей элементов. И это при том, что экранирующие конструкции составляют значительную часть массы и объемов КА. На этом фоне предложенная диссертантом задача детального моделирования наиболее распространенных конструкций на предмет эффективности экранирования, несомненно, является важной. Не менее важен и перечень поставленных и диссертантом вопросов по созданию испытательных устройств, обеспечивающих одновременное электромагнитное и тепловое воздействие на испытуемый объект, позволяющих в максимальной мере приблизиться к реальным условиям работы радиоэлектронных узлов в КА. В свете вышесказанного, тема диссертации является актуальной. Актуальность работы подтверждает и большое число проектов, как исследовательских, так и опытно-конструкторских, частью которых являлись исследования диссертанта.

Содержание работы включает введение, 3 главы и заключение.

Во введении изложена актуальность работы, ее цели и научная новизна. Описаны практическая значимость и использование результатов исследований. Изложена методология и исследований. Приведены положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов, описана апробация материалов диссертации. Охарактеризованы публикации работ автора, положенные в основу диссертации. Приведено краткое содержание глав диссертации.

В первой главе, посвященной обзору проблемы экранирования и испытаний в области электромагнитной совместимости, обсуждена актуальность постановки работ, дан обзор применяемым методам анализа и имеющимся техническим решениям (по результатам патентного поиска) по обеспечению экранирования. Здесь же приведен обзор конструкций и характеристик существующих устройств для проведения испытаний на электромагнитную совместимость, показаны их крайне ограниченные возможности на фоне современных требований и задач. На основе данного аналитического обзора сформулированы цели и задачи работы.

Вторая глава посвящена описанию собственных исследований диссертанта в области эффективности экранирования различными элементами конструкций бортовых радиоэлектронных комплексов КА. Рассмотрены такие распространенные экранирующие элементы как металлическая пластина, замкнутый корпус с апертурой в одной из стенок, корпус кабельного соединителя, являющийся одним из самых многочисленных элементов в структуре КА, рассмотрены также характеристики унифицированных электронных модулей различных размеров и корпус блока системной автономной навигации КА. Тем самым диссертант практически описал все основные экранирующие конструкции, присутствующие на борту. Для всех перечисленных конфигураций экранов методами численного моделирования построены спектральные характеристики (частотные зависимости эффективности экранирования), позволяющие определить частотные интервалы, на которых тот или иной экранирующий элемент обеспечивает достаточно высокую эффективность экранирования, и наоборот, определить частоты, на которых, и в окрестности которых велики риски нежелательных электромагнитных взаимодействий. Особый интерес, на наш взгляд, представляют исследования эффективности экранирования для различных материалов, отличающихся электрической проводимостью и магнитной проницаемостью, критичными оказываются практически все размеры экранирующих элементов и их конфигурации.

Завершающая часть данной главы посвящена описанию предложенной автором обобщенной методики анализа эффективности экранирования элементов конструкций КА. Методика содержит ряд последовательных этапов моделирования, позволяющих сначала грубо, а затем с необходимым повышением точности получать значения эффективности экранирования в рабочем диапазоне частот для заданных конфигураций и материалов экранирующих корпусов.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработкам автора, направленным на создание техники испытаний на электромагнитную совместимость. В основу автор положил известную конструкцию TEM камеры в виде отрезка закрытой полосковой линии, конусообразно сужающейся к входному и выходному коаксиальным разъемам. С использованием программы CST MWS построена и проанализирована математическая модель такой камеры и найдены оптимальные соотношения ее размеров, обеспечивающие в заданном диапазоне частот необходимую равномерность частотных характеристик. С учетом полученных моделированием рекомендаций изготовлен действующий образец TEM камеры для исследований небольших (высотой до 20мм) объектов в диапазоне до 2ГГц. В такой камере возможны испытания интегральных схем, малогабаритных устройств радиоэлектронной аппаратуры, а также биологических объектов небольших объемов, к примеру, клеток и ткани в небольших кюветах. Приведены примеры применения такой камеры с измерительным приемником для исследования эмиссии сотового телефона, а также - с генератором импульсного напряжения - для изучения влияния импульсного электромагнитного поля на состояние митохондрии печени мышей.

Показана эффективность нанесения на внутреннюю поверхность боковых стенок мюметалла, позволяющая значительно расширить рабочий диапазон камеры.

Для обеспечения одновременно климатических и электромагнитных испытаний, а также биомедицинских исследований разработана конструкция камеры, обеспечивающей проведение испытание элементов РА на помехоэмиссию и помехоустойчивость в условиях воздействия температурного поля. Выполнено моделирование температурных

ходов камеры при вариациях температуры от  $-50\text{ C}$  до  $+150\text{ C}$ , разработаны и промоделированы элементы управления температурой и ее электронной стабилизации на заданном уровне с пониженной в 5 раз нагрузкой на источник питания. На созданном лабораторном макете терморегулятора показана работоспособность предложенной конструкции.

Для испытаний устройств больших размеров предложено использование открытых GTEM-камер.

Проведено моделирование конструкции таких камер, позволяющее так же оптимизировать их размерные и электрические параметры с целью получения необходимой частотной характеристики в заданном диапазоне частот. Изготовлен и исследован лабораторный макет открытой GTEM-камеры, позволяющей испытывать объекты высотой до 250мм.

С применением разработанного подхода создана и исследована модель полосковой линии для испытаний на электромагнитную совместимость, показана возможность существенной коррекции ее частотной характеристики за счет оптимизации размерных и электрофизических параметров элементов конструкции.

В Заключении диссертации обобщены результаты, полученные моделированием и натурными экспериментами, даны оценки возможностей предложенных методик моделирования и проектирования элементов экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры, а также проектирования устройств для испытаний на электро-магнитную совместимость, в том числе, и с вариативными температурными воздействиями, а также для биомедицинских исследований с применением электромагнитных и температурных воздействий.

Научная новизна работы определяется в первую очередь новым, комплексным подходом к моделированию и анализу характеристик экранирующих элементов и камер испытательных устройств. Комплексность эта характеризуется как большим набором инструментов (аналитики, квазистатики, электродинамики), так и всесторонним описанием объекта моделирования. Данный подход позволил автору впервые показать возможность управлять частотными характеристиками различных элементов экранирования: пластин, корпусов, соединителей, унифицированных модулей и корпуса блока системы автономной навигации. Несомненно, новыми являются результаты оптимизации характеристик TEM-камер для испытаний на электромагнитную совместимость и биомедицинских исследований.

Теоретическую значимость работы определяют аналитическое описание экранирования в корпусе с апертурой, эффективное использование сразу нескольких численных методик моделирования при решении задач оптимизации экранирующих элементов и TEM-камер, а также убедительно показанный моделированием эффект снижения отражения камеры в расширенном диапазоне частот нанесением мю-металла на внутренние боковые стенки камеры.

Практическую значимость результатов диссертационного исследования М.Е. Комнатнова можно охарактеризовать как, в первую очередь, набор эффективных методик моделирования и соответствующих программных модулей, позволяющих конструировать корпуса бортовой радиоэлектронной аппаратуры, оптимальные с точки зрения необходимых уровней экранирования, выбирать для этих целей различные материалы и сплавы, избегать появления паразитных резонансов и неконтролируемых проникновений сторонних полей внутрь экранируемого устройства. Практически значимыми также

являются созданные автором варианты ТЕМ-камер и ТЕМ - климатических камер для испытаний электронных устройств и биомедицинских исследований, а также разработанные автором макеты ГТЕМ-камер и полосковой линии.

Положения диссертации, вынесенные автором на защиту, возражений не вызывают.

В методологии исследований автор использовал достаточно проверенные теоретические подходы и методы анализа, сопоставительные приемы при численном моделировании и натурных экспериментах, соответственно, достоверность полученных результатов также вне сомнений.

Результаты работы использованы в большом (около 10) количестве НИР и ОКР, внедрены в учебный процесс ТУСУР и НИ ТГУ, получено 8 свидетельств регистрации программных продуктов, поданы 3 заявки на изобретения.

Результаты диссертационной работы прошли достаточную апробацию участием и победой более чем в 10 конкурсах различного уровня, от молодежных (Томской области, УМНИК, стипендии Правительства РФ), и до уровня гранта РНФ, проектной части госзадания Минобрнауки России. Материалы работы обсуждались на Всероссийских и Международных (в т. ч., и в зарубежных) конференциях и опубликованы в 50 работах, в т. ч., в 6 журналах из перечня ВАК, в трудах 3-х зарубежных, а также трудах и тезисах 30 отечественных конференций, получен 1 патент и 8 свидетельств регистрации программных продуктов. Личный вклад автора прописан в работе достаточно корректно, 3 статьи опубликованы без соавторов.

Все вышесказанное свидетельствует о достаточно большом объеме и о высоком качестве представленной автором на защиту работы. Вместе с тем, она не свободна от замечаний.

1. Решая многочисленные задачи моделирования электрофизических процессов экранирования в сложных корпусах и соединениях, автор в большинстве случаев констатирует те или иные расчетные характеристики и, на наш взгляд, крайне мало уделяет внимания физической трактовке результатов. К частотной характеристике желателен был бы комментарий, как выглядит структура поля в экранируемом объеме, какие виды колебаний дают те, или иные резонансы в частотном спектре.
2. К примеру, на стр. 75 фиксируется рост резонансной частоты с увеличением раскрыва щели, чем он объясняется?
3. Местами фиксируются факты расхождений расчетных результатов, полученных разными методами, иногда эти расхождения значительны (см., например, стр.70), без анализа причин этих расхождений.
4. На стр. 80 детально описано применение проводящих прокладок для экранирования межмодульных щелей. При этом, отмечается, крайне критично качество контактов. Насколько этот путь эффективнее применения радиопоглощающих прокладок, для которых качество контакта не столь важно?
5. При численном моделировании полей автор называет «датчиками» точки контроля напряженностей. На наш взгляд, датчик – это, все – таки, реальное измерительное устройство.
6. В представленных графических материалах довольно трудно разделить расчетные и экспериментальные результаты.

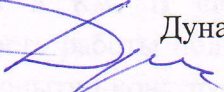
7. На рис. 3.2.1 в предполагаемой рабочей полосе частот (измерения для ТЕМ-камеры) присутствуют отдельные добротные резонансы, которые автор, по-видимому, полагает несущественными, поскольку их резонансные кривые не столь заметны, как граничный резонанс в стандартной камере. Вместе с тем, известно, что при быстром сканировании высокодобротный резонанс может «не успеть прорисоваться» в полной мере. О скорости сканирования данных частотных характеристик в тексте ничего не сказано.
8. Местами страдает стиль: на стр. 29: «..испытания зависят от корректности и точности измерения используемого оборудования (?). Оборудование не может быть некорректным.
9. Пусть и редко, но встречаются синтаксические ошибки и опечатки.

В целом, работа написана грамотно и хорошо оформлена. Вышеприведенные замечания не снижают в целом высокой оценки диссертационной работы. Автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание.

Считаю, что диссертационная работа М.Е. Комнатнова «Анализ эффективности экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата и создание устройств для испытаний на электромагнитную совместимость», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук (специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии, 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения) соответствует современным требованиям ВАК, а ее автор достоин ученой степени кандидата технических наук.

**Официальный оппонент**

Заслуженный работник высшего образования РФ,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой радиоэлектроники НИ ТГУ

  
Дунаевский Григорий Ефимович  
30.08.2016г.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский государственный университет»  
Ленина пр., 36, г. Томск, 634050,  
Тел. (3822)529852, факс (3822)529585,  
E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru), <http://www.tsu.ru>



  
Зам. Нач.  
УД  
М.Б. УДАЛОВА