

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертацию Иванова Антона Андреевича «Методы, программы и устройство для оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций радиоэлектронных средств», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук (специальность 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

**Актуальность работы.** Вопросы эффективного экранирования радиоэлектронных узлов и отдельных элементов по-прежнему составляют важную часть проблематики радиотехники, более того, с ростом требований к компактности радиоаппаратуры и ее надежности в условиях внешних воздействий, качество экранирования приобретает все большее значение. В связи с этим диссертационная работа А.А.Иванова, посвященная детальному исследованию методик экранирования и их эффективности, несомненно, является актуальной.

Несмотря на большое число работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных данной проблеме, подавляющее количество решений носит частный характер, т.е. описывает конкретную конфигурацию радиотехнических устройств, выделенные частоты воздействия. Более того, решения большей частью проводятся численными методами, что затрудняет возможности детального анализа и обобщений. Не отработаны к настоящему времени и методы измерений эффективности экранирования, имеющиеся частные решения закрывают далеко не все потребности в подобных измерениях.

В диссертационной работе А.А. Иванова поставлена цель системного подхода к данному комплексу вопросов, разработки алгоритмов и методов моделирования экранирующих конструкций, а также методов, программ и устройств для оценки эффективности экранирования, достижимой различными экранирующими конструкциями и многослойными экранами.

**Объем и содержание работы.** Диссертационная работа А.А. Иванова представлена на 182 страницах и включает в себя приложение объемом 22 страницы, список литературы из 227 наименований, а также 148 рисунков и 10 таблиц.

Автореферат объемом 18 страниц адекватно отражает содержание диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений.

Во введении изложена актуальность выбранной темы исследования, а также описана степень её разработанности. Сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна полученных результатов, а также их значимость для теории и практики. Описана использованная методология исследования. Приведены положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов, полученных в диссертации. Представлены сведения об апробации результатов работы и их использовании при выполнении НИР. Охарактеризованы основные публикации, а также личный вклад автора,

внесенный в данное исследование. Изложено краткое содержание диссертации, описаны её структура и объем.

Первая глава диссертации посвящена обзору устройств и методов, используемых для определения эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций и материалов, применяемых для их изготовления. Рассмотрены основные особенности проектирования экранирующих конструкций радиоэлектронных средств. Описаны широко распространенные экранирующие материалы, в том числе современные полимерные композиты. Отмечены основные факторы, влияющие на резонансные явления в экранирующих конструкциях. Изложены основные методы измерения эффективности экранирования материалов с применением антенн, волноводов, коаксиальных камер и двойных ТЕМ-камер. Рассмотрены существующие методы испытаний экранирующих конструкций. Описаны основные численные и аналитические методы, применяемые для оценки эффективности экранирования. Представлено краткое описание программного обеспечения для моделирования экранирующих конструкций и материалов. По результатам аналитического обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассматриваются методы математического моделирования экранирующих конструкций, разработанные соискателем в процессе диссертационного исследования. Предложены методы вычисления эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств, заполненных металлическими пластинами, диэлектрическими барьерами и радиопоглощающими материалами. Разработаны методы моделирования перфорированной стенки экранирующей конструкции и одиночного отверстия, заполненного диэлектрическим или радиопоглощающим материалом. Приведено сравнение оценок эффективности экранирования, полученных предложенными методами, численными методами конечных элементов и матрицы линий передачи, а также с помощью экспериментальных исследований макетов экранирующих конструкций в безэховой камере. В последней части главы представлены результаты разработки аналитических методов для расчета эффективности экранирования слоистых электромагнитных экранов из полимерных композитных материалов. Выполнена проверка этих методов с использованием численного метода конечных разностей во временной области, а также экспериментальной установки, основанной на коаксиальной камере и векторном анализаторе цепей.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов и программного обеспечения для моделирования экранирующих конструкций. Выполнена проверка рассмотренных в обзоре аналитических методов на примере типовых экранов: с тонкой щелью, перфорированной стенкой, группой прямоугольных апертур и т.д. Полученные результаты обобщены и использованы при разработке алгоритма и программного обеспечения для аналитической оценки эффективности экранирования цилиндрических и прямоугольных экранирующих конструкций. С помощью созданной программы разработаны корпуса для фильтра силовой шины электропитания, эквивалента сети, а также

блока питания и управления климатической экранированной камеры. Создан прототип программы для моделирования металлических и неметаллических слоистых экранов с собственной библиотекой экранирующих материалов. Выполнена программная реализация численного метода матрицы линий передачи для его применения к задачам электромагнитного экранирования. Используя этот метод, детально исследованы экранирующие свойства системы, состоящей из двух металлических корпусов. На основе полученных результатов предложена методика оптимизации экранирующих конструкций радиоэлектронных средств.

В четвертой главе приведены результаты разработки устройства для косвенных измерений эффективности экранирования без необходимости размещения антенны внутри экрана. Разработана модифицированная методика косвенных измерений, предназначенная для цилиндрических экранов с апертурой в торцевой части. Описан созданный прототип программного обеспечения устройства. Предложены 4 конструкции полосковых линий передачи, служащих для проведения косвенных измерений эффективности экранирования, а также описаны их преимущества и недостатки. Выполнено сравнение частотных зависимостей эффективности экранирования цилиндрического и прямоугольного экрана, полученных косвенным методом измерений и с помощью численных и аналитических методов. Создан внешний облик аппаратной части устройства, а также разработана и описана её структурная схема.

В заключении обобщены результаты диссертационного исследования и выполнено их сопоставление с паспортом научной специальности. Сформулирована решенная научно-техническая задача. Приведены рекомендации по практическому применению результатов работы. Описаны перспективы дальнейших исследований в рамках выбранной темы.

В приложения вынесены документы, подтверждающие внедрение результатов работы, а также основные индивидуальные достижения соискателя.

Структура диссертационной работы адекватна и соответствует государственному стандарту ГОСТ Р 7.0.11 – 2011.

**Научная новизна** работы А.А.Иванова заключается в разработке аналитических методов оценки эффективности экранирования плоских экранов и типовых конструкций с учетом заполнения последних радиоматериалами и печатными платами, а также в предложенных методиках оптимизации экранирующих конструкций. К новым результатам можно отнести довольно большой перечень описанных включений в апертурный раскрыв экранирующего корпуса, а также варианты расположения в нем диэлектрических включений, печатных плат, внутренних экранирующих корпусов. Новыми являются и предложенные автором методики измерений эффективности экранирования металлических экранирующих конструкций. Новизна технических решений подтверждена патентами, новизна программных решений – свидетельствами о госрегистрации программ для ЭВМ.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы А.А.Иванова заключается в развитии аналитических методов расчетов эффективности



экранирования для экранирующих конструкций, в том числе, и в модификации аналитической методики ее расчета для многослойных экранов.

**Практическую значимость** работы определяют предложенная оптимизация произвольных экранирующих конструкций с точки зрения эффективности экранирования, методика оценки эффективности экранирования на основе измерений параметра  $S_{11}$ , создание прототипа программного обеспечения и структурная схема устройства для косвенных измерений эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций.

**Достоверность результатов и научных положений.** Достоверность полученных в диссертации теоретических результатов сомнений не вызывает, поскольку применены достаточно надежные методы теории цепей, линий передачи, присутствует достаточно убедительное сопоставление результатов расчета аналитическими и численными методами, а также и результатами измерений. Эффективность предложенной измерительной методики и оснастки подтверждена экспериментально.

**Апробация результатов работы и их публикация.** Результаты диссертационного исследования прошли достаточную апробацию участием и победой в конкурсах различного уровня (от внутривузовского до уровня гранта РФФИ). Материалы работы были представлены и обсуждены на 7 конференциях, проводимых на территории РФ в период с 2016 по 2021 гг. Результаты исследования опубликованы в 27 работах, из которых 4 – в изданиях из перечня ВАК, 1 – в журнале из первого квартиля (Q1) наукометрической базы данных Scopus; 5 – в других изданиях, индексируемых Scopus или WoS. Имеются 2 патента на изобретения, а также 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Использование и внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы в 9 НИР, внедрены в учебный процесс ТУСУРа, а также в работу двух предприятий: АО «ИСС» и ООО «НПК «ТЕСАРТ».

**К работе есть несколько замечаний.**

1. Анализируя в каждом случае полученный теоретический, либо экспериментальный результат, автор в основном детально обсуждает технический аспект, и не всегда уделяет внимания его физической природе. В итоге каждый раз возникает вопрос, насколько частным или общим является полученный результат

Примером может служить роль наблюдаемых резонансных явлений в корпусах которые, на мой взгляд, можно было бы обсудить подробнее.

2. Многослойный экран анализируется последовательным соединением характеристических импедансов отрезков эквивалентных линий, описывающих отдельные слои экрана. При возбуждении подобных многослойных систем плоской электромагнитной волной возможны многократные переотражения, влияющие на итоговые характеристики отражения и пропускания сэндвича. Не исключено, что в слоях с проводимостью этот эффект не столь значителен, тогда следовало бы оговорить границы применимости предложенного подхода.

3. Ряд результатов получен для так называемого «стандартизированного корпуса». При этом речь об одном размере и одном диапазоне частот, и не

оговорено, какие еще размеры предусмотрены этим, или другими стандартами, и насколько к ним применимы полученные результаты.

4. Обычно термин «оснастка» применяется к элементам технологического процесса, не играющим принципиальной роли, позволяющим упростить или унифицировать операции. В работе этот термин применен, на мой взгляд, не совсем удачно, к функционально важному элементу измерительной установки – полосковой линии (антенне).

5. Несмотря на в целом грамотное изложение и хорошее оформление работы, изредка встречаются синтаксические ошибки пропущенные, либо лишние запятые, ( см. стр.17, 36, 37, 55, 103, 106), а также стилистические неточности ( стр.34, начало).

Приведенные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки работы.

Считаю, что диссертационная работа А.А. Иванова «Методы, программы и устройство для оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций радиоэлектронных средств» соответствует существующим требованиям ВАК, а её автор достоин присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент

заслуженный работник высшего образования РФ,

доктор технических наук, профессор,

зав. кафедрой радиоэлектроники

НИ ТГУ

Дунаевский Григорий Ефимович

« 29 » \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 2021 г.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский

Томский государственный университет»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36,

тел. (3822) 529 582

e-mail: rector@tsu.ru



Подпись

УДОСТОВЕРЯЮ

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ТГУ

Н. А. САЗОНОВА