

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Заболоцкого Александра Михайловича

### **«Модели, алгоритмы, методики, технологии и устройства для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата»,**

представленную на соискание учёной степени

доктора технических наук

по специальностям 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

#### **Актуальность темы диссертации**

При разработке критичной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), например, бортовой РЭА космических аппаратов (КА), важным является не только выполнение заданных функций, но и повышение надёжности. Для обеспечения надёжности проводятся всесторонние испытания, например, на электромагнитную совместимость (ЭМС). В соответствии со стандартами рекомендуется проводить дорогостоящие испытания в диапазоне частот до 1, 18 и 40 ГГц, поэтому для уменьшения количества проводимых испытаний при проектировании используется компьютерное моделирование. В результате возникает необходимость в создании программного обеспечения, позволяющего выполнить моделирование ЭМС РЭА, а для выполнения требований по ЭМС необходимы новые технические решения и устройства.

#### **Научная новизна**

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

1) модели, алгоритмы и программы для вычисления отклика схемы из отрезков многопроводных линий передачи с RLC-элементами на стыках, учитывающие паразитные параметры пассивных электронных компонентов и частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости материалов;

2) технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках, основанная на выборе оптимальных параметров проводников и диэлектриков;

3) технология модальной фильтрации, основанная на уменьшении амплитуды нежелательного сигнала за счет его разложения в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением;

4) технология модального разложения и восстановления, основанная на явлении разложения сигнала и последующего восстановления его в многоотрезочных структурах многопроводных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением;

5) помехозащитные устройства на основе печатных и кабельных структур, отличающиеся использованием модального разложения нежелательного сигнала.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность научных положений и выводов подтверждается грамотным обоснованием и теоретической проработанностью методов исследования, применением адекватных теоретических подходов к созданию моделей, алгоритмов и программ для моделирования печатных узлов бортовой РЭА КА. Представленные технологии основываются на использовании теории линий передачи, квазистатического и электродинамического анализа. Кроме того, основные положения и выводы подтверждаются соответствующими результатами измерений.

**Практическая значимость** результатов диссертационной работы подтверждается актами внедрения.

## **Достоверность результатов**

Достоверность результатов подтверждена следующим:

1) совпадением результатов компьютерного моделирования, полученных различными методами вычисления форм сигнала в схемах из отрезков многопроводных линий передачи;

2) совпадением результатов компьютерного моделирования, выполненного различными программными продуктами;

3) согласованностью результатов измерений и компьютерного моделирования;

4) воспроизводимостью результатов измерений.

Результаты исследования обсуждались на научных конференциях международного и всероссийского уровней и опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

## **Анализ содержания диссертации**

В состав диссертации входят: введение, 5 глав, заключение, список литературы из 344 наименований, список сокращений, приложение на 64 с. Объём диссертации с приложением – 359 с., в т.ч., 206 рис. и 38 табл. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 164 работы, в том числе, 34 статьи в журналах из перечня ВАК, 8 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science и 15 – Scopus.

Автореферат диссертации написан и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ и ГОСТ 7.0.11–2011. Он полно отражает содержание диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации соискатель выполнил обзор современного состояния проблемы обеспечения ЭМС бортовой РЭА КА. Описаны технологии помехозащиты РЭА, а также методы и средства моделирования печатных узлов. В конце главы сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** представлены три модели и описана программная реализация, позволяющие выполнять вычисление отклика фрагментов печатной платы РЭА. Представлены результаты тестирования путем сравнения с опубликованными результатами измерений или моделирования, а также

полученными в программе PSpice и системе CST MWS. Выполнен анализ импеданса пассивных компонентов в диапазоне частот. Описаны *методики* синтеза широкополосных моделей пассивных двухполюсных компонентов из RLC-элементов и определения значений относительной диэлектрической проницаемости двухсторонне фольгированных материалов. Представлены методики для анализа ЭМС печатных узлов РЭА и приведены примеры анализа ЭМС в реальном печатном узле бортовой РЭА КА.

**В третьей главе** приводятся основы трех технологий обеспечения ЭМС. Для каждой технологии отражены результаты теоретических и экспериментальных исследований

. Представлены условия: уменьшения влияния модальных искажений на форму импульса и разложения импульса в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением; восстановления импульса в конце структуры из произвольного числа отрезков линий передачи. Приведены формулы: для амплитуд напряжения импульсов разложения в проводниках согласованной многопроводной линии передачи; связывающие число и параметры отрезков для разложения импульса с заданными параметрами; для вычисления коэффициента ослабления на каскад модального фильтра. Описаны структуры меандровых линий задержки, которые позволяют увеличить пропускную способность линий передачи печатных плат РЭА (получен патент на устройство). Представлены результаты одиночного и многокаскадного использования МФ, а также их совместного использования с традиционными методами защиты. Показаны возможность и значимость использования модальной фильтрации для ослабления воздействия в форме электростатического разряда в бортовой РЭА КА.

**В четвёртой главе** представлены результаты исследований межсоединения помехозащищенной теплопроводной монтажной платы и печатной платы бортовой РЭА КА. Представлены устройства помехозащиты бортовой РЭА КА.

**В пятой главе** рассмотрены многочисленные технические решения для обеспечения ЭМС РЭА. Среди которых можно выделить технические решения, защищённые патентами на изобретения.

В конце каждой главы приведены основные выводы. В приложении представлены документы, свидетельствующие о масштабном внедрении результатов диссертации в производство и учебный процесс.

**Автореферат диссертации** выполнен в соответствии с требованиями ВАК и полной мере отражает содержание диссертационной работы.

**К достоинствам диссертации** можно отнести многоплановость, полноту проработки поставленных задач и наличие ряда оригинальных теоретических и технических решений.

#### **Замечания и недостатки**

1. Алгоритмы и программы для вычисления отклика представлены не совсем удачно: нет блок-схемы, не приведены листинги программ.
2. Во второй главе приведены сравнения результатов, полученных автором квазистатическим методом и с использованием электродинамического анализа, с результатами других авторов, показывающие корректность вычисления программного продукта, однако в третьей и четвертой главах этот вопрос изложен недостаточно полно.
3. В разделе 4.5 представлен анализ вариантов расположения модального фильтра в блоке бортовой аппаратуры космического аппарата. Однако не ясно, используются ли структуры модальных фильтров при изготовлении бортовой аппаратуры космического аппарата.
4. В работе уделяется мало внимания вопросам метрологического обеспечения экспериментальных исследований.
5. Имеются погрешности оформления автореферата и диссертации:
  - опечатки на стр. 8, 55 диссертации и в автореферате,
  - отсутствие координатных сеток на осциллограммах, представленных на рис. 3.44, 3.46- 3.48 диссертации, и ряд других.
6. Изложение подразделов «Основные результаты главы» первых четырёх глав диссертации громоздко и представляет собой в основном перечисление полученных в подразделах глав результатов, а не краткое изложение основных положений и выводов, обладающих научной новизной и практической значимостью; в подразделе 5.2.2. пятой главы не проведено ранжирование полученных автором технических решений, защищённых патентами.

Однако указанные замечания не умаляют достоинств диссертационной работы, которая написана в хорошем стиле, грамотным языком, оформлена в соответствии с установленными требованиями.

### **Заключение**

Диссертация А.М. Заболоцкого является завершённым научным исследованием, выполненным автором на актуальную тему на хорошем научном уровне, обладает теоретической и высокой практической значимостью. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Считаю, что рассматриваемая диссертация полностью удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а её автор, Александр Михайлович Заболоцкий, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальностям 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Средства связи  
и информационная безопасность»  
Омского государственного технического  
университета

*Май*

/Майстренко В. А./

ОмГТУ  
пр. Мира, 11, Омск, 644050  
e-mail: mva@omgtu.ru, тел. 8 (3812) 65-85-60

Подпись профессора Майстренко В. А. удостоверяю.  
Учёный секретарь университета

*Немпова*

/Немпова А.Ф./



*08.10.2016 г.*