

УТВЕРЖДАЮ
Исполняющий обязанности
проректора МАИ (НИУ)
по научной работе
Раздолин А.М
«31» 06 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на диссертационную работу Заболоцкого Александра Михайловича «Модели, алгоритмы, методики, технологии и устройства для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата», представленную на соискание ученой 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 работы

Широкое применение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в самых различных отраслях науки и промышленности, таких как оборонная, атомная, транспортная и космическая, значительно повышает требования к РЭА. Восприимчивость РЭА к воздействию электромагнитных помех, на современном этапе научно-технического развития из-за увеличения плотности размещения, компоновки и трассировки, снижения напряжения питания интегральных схем возрастает.

Всё чаще выявляются ситуации, когда из-за высокой восприимчивости удовлетворительное функционирование систем становится невозможным, что для ряда систем бывает совершенно недопустимо, поскольку связано с риском аварийных ситуаций и как следствие материальных потерь. Поэтому

при проектировании РЭА актуально обеспечение высокой степени помехоустойчивости и помехозащищенности. Расширяющееся использование космоса делает актуальным обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) бортовой РЭА космического аппарата (КА). Особое внимание в решении этой проблемы должно уделяться защите от излучаемых электромагнитных помех (ЭМП), опасность которых возрастает вследствие постоянного расширения диапазона рабочих частот, что, в свою очередь, приводит к возрастанию требований при проведении испытаний. В соответствии со стандартами испытания бортовой РЭА КА рекомендуется проводить в диапазонах частот до 1, 18, 40 и даже 100 ГГц. Строгие требования предъявляются к испытаниям на воздействие кондуктивных ЭМП, которые появляются в результате выбросов по цепям питания и других переходных процессов.

Соответствие темы диссертации научным специальностям

В диссертации Заболоцкого А.М. для выполнения корректного моделирования ЭМС бортовой РЭА предложены модели, алгоритмы и программы для вычисления отклика схемы состоящей из отрезков многопроводных линий передачи с RLC-элементами в местах соединения, учитывающие паразитные параметры пассивных электронных компонентов и частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости материалов. Для уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках предложена технология, основанная на выборе оптимальных параметров проводников и диэлектриков. Для повышения помехоустойчивости бортовой РЭА КА к воздействию сверхкоротких импульсов (СКИ) предложен принцип модальной фильтрации, основанный на уменьшении амплитуды нежелательного сигнала за счет его разложения в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением. Предложено использование модального разложения и восстановления сигнала, основанное на явлении разложения сигнала и последующего восстановления его в многоотрезочных

структурах многопроводных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением. Для повышения помехозащищенности элементов и устройств бортовой РЭА КА созданы устройства на основе печатных и кабельных структур, реализующие принцип модального разложения нежелательного сигнала.

Тема диссертационной работы Заболоцкого А.М. соответствует двум специальностям: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» в области исследования «Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств» (п. 9 паспорта специальности); 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» в области исследования «Исследование характеристик антенн и СВЧ устройств, для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т.д.» (п. 2 паспорта специальности).

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит список используемых источников из 344 наименований, 206 рисунков, 38 таблиц и одно приложение. Общий объем диссертации – 359 страниц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также их апробация. В главе 1 выполнен обзор исследований по обеспечению ЭМС бортовой РЭА, обоснованы и сформулированы конкретные задачи и цель работы. В главе 2 приведены разработанные модели, алгоритмы, программы и методики для моделирования ЭМС бортовой РЭА КА. В главе 3 предложены модальные технологии для обеспечения ЭМС. В главе 4

представлены устройства для обеспечения помехозащищенности РЭА. В главе 5 представлены технические решения для обеспечения ЭМС РЭА. В заключении сделаны выводы по работе. В приложении приведены акты внедрения результатов диссертационной работы, копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, копии патентов на полезную модель и изобретение.

Научная новизна полученных автором результатов, выводов и рекомендаций.

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны модели, алгоритмы и программы для вычисления отклика схемы состоящей из отрезков многопроводных линий передачи с RLC-элементами в местах соединения (стыках), учитывающие паразитные параметры пассивных электронных компонентов и частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости материалов.

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

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

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

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

Значимость результатов работы для науки и практики

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Получены собственные значения и векторы для различных видов многопроводных линий передачи печатных плат и кабелей бортовой РЭА КА, форм и числа их проводников, значений параметров их проводников и диэлектриков.

2. Для печатных плат и кабелей бортовой РЭА КА выполнено теоретическое обоснование возможностей: уменьшения взаимовлияний проводников; интегрированной защиты от сверхкоротких импульсов делением на импульсы меньшей амплитуды за счет разности задержек мод структуры; разложения и последующего восстановления сигналов.

3. Доказана достаточность вычисления лишь собственных значений и векторов для обоснования ряда выводов.

4. Сформулированы условия: прохождения импульса через виток линии задержки без искажений его формы; минимизации модальных искажений; разложения и восстановления импульсного сигнала в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением.

5. Получены выражения для вычисления амплитуд импульсов разложения в согласованном отрезке многопроводных линий передачи и коэффициента ослабления многокаскадного модального фильтра.

6. Показано, что изменение параметров печатных проводников бортовой РЭА КА может изменить знак разности погонных задержек четной и нечетной мод связанных линий.

7. Получены аналитические математические модели частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости для типовых материалов печатных плат.

8. Теоретический инструментарий моделирования ЭМС бортовой РЭА КА до частоты 40 ГГц расширен разработанной методикой анализа пассивных цепей с учётом паразитных параметров и полученными многорезонансными моделями резистора, конденсатора и индуктивности.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Программно реализованы 3 модели для вычисления временного и частотного откликов произвольных схем многопроводных линий передачи, что позволяет (в рамках квазистатического подхода) осуществить моделирование временного и частотного откликов реальных фрагментов многопроводных межсоединений.

2. Предложено уменьшение модальных искажений в межсоединениях печатных плат нанесением покрывающего диэлектрического слоя и возможность модальных искажений в реальных кабелях.

3. Предложен метод защиты от сверхкоротких импульсов посредством их последовательного разложения в отрезках многопроводных межсоединений на большее число импульсов меньшей амплитуды.

4. Предложен способ коррекции формы импульсного сигнала с помощью меандровых линий за счет взаимных влияний в проводниках линии.

5. Показано, что можно изменять знак разности погонных задержек мод двух проводников, планарно расположенных в диэлектрике над идеально проводящей плоскостью, от $-0,8$ до $+1,5$ нс/м.

6. Выполнен анализ собственных значений и векторов для гибкого печатного кабеля бортовой РЭА КА и показана возможность модального разложения импульса в нём. Получены частотные и временные отклики сигнала для различных видов линий передачи, форм и чисел их проводников, значений параметров их проводников и диэлектриков, а также количества и длин отрезков линий передачи и граничных условий на их концах.

7. Разработаны рекомендации по улучшению ЭМС: пяти унифицированных электронных модулей энергопреобразующего комплекса; унифицированного электронного модуля блока аппаратуры радионавигации; печатной платы макета радиотракта системы автономной навигации; печатного узла системы автономной навигации.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов подтверждается их использованием в ходе выполнения ряда работ выполняемых в ТУСУР, по грантам РФФИ, РНФ и в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, а также при выполнении хоздоговоров и ОКР, в рамках реализации Постановления 218 Правительства РФ.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов работы

1. Достоверность при получении моделей, алгоритмов и программ подтверждена сравнением результатов моделирования с результатами других авторов, других программных продуктов и натурального эксперимента, проведенного на сертифицированном оборудовании. Для моделей пассивных двухполюсных компонентов из RLC-элементов получена согласованность результатов экспериментальных исследований сертифицированными векторными анализаторами цепей. Для моделей частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов печатных плат показана воспроизводимость результатов при многократных измерениях.

2. Достоверность предложенной модальной фильтрации для обеспечения ЭМС основана на известных методах теории цепей. Полученные теоретические результаты подтверждены натурными экспериментами, как качественно, так и количественно, в пределах допускаемой погрешности измерения. Эксперименты выполнены с использованием сертифицированных приборов, для реальных печатных плат и кабелей.

3. Возможность практической реализации устройств подтверждена их изготовлением в АО «НПЦ «Полус» и «ИСС». Для совершенствования параметров устройств использованы проверенные методы оптимизации. Получено совпадение результатов, полученных при квазистатическом анализе, электродинамическом анализе и экспериментально.

Работоспособность созданных устройств подтверждена натурными экспериментами и их эксплуатацией.

4. Реализуемость предложенных способов и устройств на практике подтверждена моделированием и экспериментально.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке бортовой РЭА КА и критичной РЭА на предприятиях оборонной, атомной и транспортной отраслей промышленности.

Замечания по диссертационной работе

1 В работе не указано, что является предметом исследования а что объектом исследования .

2 Следовало бы конкретизировать формулировку цели работы. Отмеченное в формулировке обеспечение ЭМС РЭА, широкое понятие, включающее помимо фильтрации ряд направлений: исследование электромагнитной обстановки; проведение испытаний; заземление и рациональный монтаж; экранирование и т.п., тогда как работа посвящена повышению помехоустойчивости только за счет фильтрации сверхкоротких импульсов.

3 В работе отсутствует обоснование названия модальный фильтр. Неясно, какое отношение имеет предлагаемый тип фильтра, с диэлектрическими неоднородностями к модам. Известно, что мода это вид колебаний, возбуждаемый в сложных колебательных системах, характеризующийся пространственной конфигурацией, определяющийся положением узловых точек и собственной частотой.

4 В работе не отмечено, что модальный фильтр может осуществлять фильтрацию только кондуктивных импульсных электромагнитных помех. Следовало бы отметить, что в случае воздействия излучаемых электромагнитных помех модальный фильтр теряет свои свойства и должен быть защищен электромагнитным экраном.

5 В качестве критерия оптимального выбора параметров проводников и диэлектриков микрополосковой линии в работе выбрано отношение толщины диэлектрика к ширине проводника. Из текста работы неясно почему выбран именно такой критерий. Почему оптимальным значением этого критерия является величина 0,25? При этом не учитываются такие параметры диэлектрика, как диэлектрическая проницаемость, соотношение диэлектрической проницаемости подложки и покрытия, длина проводника и его высота.

В выводах по разделу и в работе в целом не приведены практические советы по выбору оптимальных параметров проводников и диэлектриков. Следует отметить, что технологически задача контроля толщины диэлектрика сложная и трудозатратная.

Неясно почему соискатель сделал вывод о том, что оптимальное значение отношения толщины диэлектрика к ширине проводника равно 0,25, т.к. в п4.4 на стр. 212 диссертационной работы это соотношение равно 1,15.

6 В работе предложена технология восстановления входного сигнала модального фильтра, но не представлен алгоритм такого восстановления. Неясно, что понимается по откликом модального фильтра при отсутствии входного сигнала. Недостаточно обоснована необходимость восстановления сигнала. Отмечено только то, что явление восстановления импульса может быть причиной отсутствия срабатывания защитных приборов

7 В работе получены модели конденсатора и индуктивности, состоящие соответственно из 22 и 16 контуров со значениями элементов в приведенными в таблицах 2.4 и 2.5. Однако не приведены формулы, по которым осуществлялся расчет значений элементов, и отсутствуют ссылки на литературные источники.

8 Копия акта внедрения в учебный процесс КНИТУ-КАИ приведена два раза (стр. 304 и 311).

Заключение

Указанные замечания не снижают достоинств работы, выполненной на высоком научном уровне. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее основное содержание.

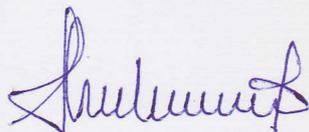
Диссертация Заболоцкого Александра Михайловича является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема разработки моделей, алгоритмов, методик, технологий и устройств, имеющая важное народнохозяйственное значение для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением правительства РФ от 24.09.13 №842 (ред. от 30.07.2014), а её автор заслуживает присвоения ему учёной степени доктора технических наук по специальностям 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на заседании кафедры «Теоретическая электротехника» 1 июня 2016 г., протокол №10 .

Отзыв на диссертационную работу обсужден и утвержден на заседании кафедры «Теоретическая электротехника» 8 июня 2016 г., протокол №11.

Заведующий кафедрой 309 «Теоретическая электротехника»

д.т.н., профессор



Кириллов Владимир Юрьевич

Тел/факс: 8(499)1584187

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993
Факс: +7 499 158-29-77, E-mail: mai@mai.ru