

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

В настоящее время при разработке бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов необходимо учитывать требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Поэтому в процессе проектирования применяют, как моделирование, так и испытания на ЭМС для проверки соответствия требованиям стандартов и технического задания. Однако проведение испытаний является сложной, а иногда даже невозможной задачей. Тогда разработчики в основном полагаются на результаты компьютерного моделирования радиоэлектронной аппаратуры. Для получения корректных результатов при моделировании необходимы алгоритмы и программы на их основе, а также точные математические модели для компонентов и диэлектрических материалов печатной платы, учитывающие их поведение в широком диапазоне частот (от 10 кГц до 1, 18, 40 ГГц). Такие модели, особенно для отечественных компонентов и материалов, широко используемых на отечественных предприятиях космической отрасли, отсутствуют. Наличие моделей повышает привлекательность применения отечественных компонентов и материалов, а также способствует развитию критической технологии РФ по созданию электронной компонентной базы. Другой важной задачей является повышение запаса помехоустойчивости бортовой радиоэлектронной аппаратуры без увеличения её массы в связи переходом на негерметичные конструкции. Один из подходов её повышения – использование защитных приборов, которые устанавливаются на входе блоков и узлов. Однако даже современные защитные приборы обладают существенными недостатками, например, паразитными параметрами и недостаточным быстродействием. Это приводит к тому, что для обеспечения эффективной защиты в широком диапазоне воздействий используют сложные многоступенчатые схемы защиты. Между тем, хорошо, когда характеристики сочетаются низкой стоимостью и простотой конструкции, так что необходим поиск новых принципов совершенствования защиты. Таким образом, необходимы новые способы, технологии обеспечения ЭМС и подходы к созданию новых устройств помехозащиты. Именно решению проблемы разработки моделей, программ, методик, технологий и устройств для обеспечения ЭМС бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата посвящена диссертационная работа А.М. Заболоцкого. Поэтому актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 344 наименований и приложения на 64 с. Объем диссертации с приложением – 359 с., в т.ч., 206 рисунков и 38 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность и описано использование результатов работы.

В первой главе приведена актуальность обеспечения ЭМС радиоэлектронной аппаратуры и обосновывается необходимость обеспечения ЭМС бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Приведен обзор технологий и устройств для защиты радиоэлектронной аппаратуры от преднамеренных электромагнитных воздействий, а также представлен обзор методов и средств моделирования. В конце сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены разработанные модели, алгоритмы, программы и методики для моделирования ЭМС печатных узлов бортовой радиоэлектронной аппаратуры с учетом паразитных параметров пассивных электромагнитных компонентов и частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости материалов печатных плат. Представлены результаты программной реализации вычисления отклика путем сравнения с опубликованными результатами измерений и моделирования. Представлены разработанные методики анализа ЭМС печатных плат.

В третьей главе представлены три технологии для обеспечения ЭМС радиоэлектронной аппаратуры. Вначале описывается технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках за счет оптимального выбора параметров проводников и диэлектриков. В рамках данной технологии представлены результаты исследований по уменьшению взаимовлияний за счет диэлектрического покрытия печатных плат и уменьшения искажений импульсного сигнала в меандровой линии. В следующем разделе представлена технология модальной фильтрации, которая основана на разложении импульсного сигнала в связанных линиях передачи, приведены теоретические и экспериментальные исследования модальной фильтрации в печатных платах и кабелях. В последнем разделе представлена технология модального разложения и восстановления, которая основана на явлении разложения и последующего восстановления импульса в различных структурах линий передачи. Также выполнены теоретические и экспериментальные исследования.

В четвертой главе представлены устройства для обеспечения помехозащиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Показаны структуры печатных плат с интегрированной модальной защитой. Приведены оригинальные конструкции помехозащитных устройств. Описан детальный анализ вариантов расположения модального фильтра в составе корпуса прибора с унифицированными электронными модулями бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

В пятой главе подробно описаны технические решения для обеспечения ЭМС радиоэлектронной аппаратуры.

В заключении сформулированы основные выводы по работе.

В приложении представлены копии актов внедрения результатов работы, патентов на изобретение, свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Оценивая полученные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации, следует отметить, что в работе для решения проблемы используется комплексный подход, включающий различные виды анализа, использование компьютерного моделирования и натурального эксперимента, различные методы анализа и синтеза линейных электрических цепей. Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Разработаны 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. Для получения моделей решалась фундаментальная задача определения связи между частотной характеристикой компонента и его эквивалентной схемой. В отличие от существующих методов, которые являются частными и рассчитаны либо на заранее определённые структуры и компоненты, предлагается решить задачу структурно-параметрического синтеза оптимальных эквивалентных схем по частотной характеристике S-параметров.

2. Технология уменьшения взаимовлияний в печатных проводниках печатных проводниках. В рамках её предложено необычное использование влагозащитного лака (причем лишь за счет корректного выбора его толщины) для уменьшения перекрестных наводок и искажений формы импульсного сигнала в структурах печатных плат. Получены структуры линий задержки неискажающие импульс (Патент 2556438 РФ). Использование данной технологии позволит уменьшить уровень перекрестных наводок и искажения полезного сигнала в печатных узлах бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

3. Технология модальной фильтрации, предназначенная для защиты от кондуктивных воздействий сверхкоротких импульсов. На основе использования модальных искажений (изменений сигнала за счет разности задержек мод многопроводной линии передачи) предложена защита за счет последовательного модального разложения импульса в отрезках связанных линий. Результаты исследований опубликованы в зарубежных журналах «IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility» и «International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing», что свидетельствует о мировом уровне новизны полученных результатов. Предложено создание нового класса устройств для обеспечения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры – модальных фильтров. При их создании могут использоваться полосковые структуры на фольгированном стеклотекстолите, отличающиеся радиационной стойкостью, малой массой и дешевизной, что актуально при создании бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата.

4. Технология модального разложения сигнала и последующего восстановления его в многоотрезочных структурах многопроводных линий с неоднородным диэлектрическим заполнением. В работе доказано, что данное

явление обусловлено тем, что последовательно соединенные отрезки многопроводных линий могут иметь различные знаки разности задержек мод. Отмечено, что данное явление может быть одной из причин низкой эффективности защитных приборов и выхода из строя элементов бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Представлена методика поиска структур, имеющих скрытые модальные воздействия. Обеспечение ЭМС бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата требует выявления подобных структур.

5. Разработаны конструкции помехозащитных устройств на основе печатных и кабельных структур, отличающиеся использованием модального разложения нежелательного сигнала. При разработке выполнен точный учет особенностей и материалов конструкций печатных и кабельных структур, применяемых в бортовой радиоэлектронной аппаратуре космического аппарата.

Обоснованность научных положений, результатов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается согласованностью данных эксперимента и теоретических результатов. В качестве теоретической основы исследования использовалась теория модального анализа, методы анализа и синтеза линейных цепей, описанных в научных работах отечественных и зарубежных авторов. Для выполнения компьютерного моделирования соискателем разработан инструмент, позволяющий выполнить вычисления в частотных и временных областях в рамках квазистатического подхода. В каждой оригинальной главе диссертационной работы сравниваются результаты моделирования и эксперимента и делаются выводы, которые логически вытекают из материалов исследований. Технические решения, представленные в диссертации, обоснованы проведенными исследованиями, а их реализуемость подтверждена 10 патентами на полезную модель и изобретения.

Примечательно, что по результатам исследований еще подано 28 заявок на изобретения (не только на устройства, но и на способы), причем на 9 из них совсем недавно получены положительные решения. Как следует из сайта ФИПС, это заявки с номерами 2014154086, 2014154084, 2014151794, 2015120797, 2015137528, 2015129253, 2015129263, 2015137547, 2015156667.

Кроме того, результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях.

Достоверность подтверждается сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований; совпадением результатов, полученных при компьютерном моделировании и натурном эксперименте. Эксперименты выполнены на разных сертифицированных приборах.

Замечания и недостатки

1. Во второй главе для разработки многорезонансных моделей представлена методика их получения, но не представлены формулы, на основе которых выполняется вычисление значений их элементов.

2. В работе не отмечено, как изменятся характеристики предлагаемых устройств при воздействии внешнего электромагнитного поля.

3. Большой объем результатов представлен в виде рисунков и таблиц, которые получены с помощью компьютерного моделирования. Поэтому в приложении следовало бы привести распечатки программного кода.

4. В списке литературы некоторые ссылки повторяются (5-10, 72-243, 133-202, 183-187, 216-226, 222-241, 252-257, 283-302) соответственно список уменьшится до 336 наименований.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Указанные замечания не снижают достоинств работы, выполненной на высоком профессиональном уровне. Считаю, что работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённым постановлением правительства РФ от 24.09.13 №842, а её автор, Заболоцкий Александр Михайлович, заслуживает присвоения 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

Хрусталеv Владимир Александрович

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20
Тел. (383) 346-06-64
E-mail: va_khrustalev@ngs.ru

Подпись профессора Хрусталева В.А. удостоверяю:
Ученый секретарь НГТУ

Шумский Геннадий Михайлович

06.10.16

