

На правах рукописи



Нуриев Марат Гумерович

**Модели и методика физического моделирования электромагнитных
помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости
элементов вычислительной техники**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» на кафедре «Системы автоматизированного проектирования».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гизатуллин Зиннур Марселевич.

Официальные оппоненты: Грачева Елена Ивановна,
доктор технических наук, доцент, профессор
Казанского государственного энергетического
университета, г. Казань.

Куксенко Сергей Петрович,
кандидат технических наук, доцент
Томского государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, г. Томск.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
г. Москва

Защита состоится «27» сентября 2019 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.10 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10 (ком. 236, зал заседаний ученого совета).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.079.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КНИТУ-КАИ и на сайте: <http://old.kai.ru/science/disser/>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент, к.т.н.



Каляшина Анна Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Вычислительная техника (ВТ) применяется для решения широкого спектра задач народного хозяйства и эффективность их применения тесно связана с надежным функционированием в реальных условиях эксплуатации, где присутствуют разные источники электромагнитных помех. По оценкам специалистов, наиболее эффективным способом обеспечения помехоустойчивости элементов ВТ является принятие необходимых мер для снижения помех на ранних этапах разработки устройств, на основе результатов прогнозирования. Но прогнозирование существенно усложняется, если электромагнитные помехи создаются макроисточниками (разряд молнии, промышленные источники, локальные преднамеренные источники и др.) или при формировании электромагнитной обстановки вокруг устройства участвуют макрообъекты (конструкция здания, молниеотвод, фюзеляж летательного аппарата, кузов транспортного средства и др.). В данном случае, для исследований в реальном масштабе, необходимы существенные материальные и временные затраты на изготовление макетов объекта исследования и имитаторов электромагнитного поля. Поэтому возникает актуальная задача исследования помех в линиях связи на основе физического моделирования для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников. Метод физического моделирования предполагает создание лабораторной физической модели объекта исследования в уменьшенных масштабах и проведение экспериментов на этой модели. Выводы и данные, полученные в этих экспериментах, распространяются затем на объекты в реальных масштабах.

Различные аспекты исследования помехоустойчивости и надежности работы элементов ВТ при воздействии электромагнитных помех отражены в работах Л.Н. Кечиева, Н.В. Балюка, П.В. Степанова, В.И. Кравченко, Л.О. Мыровой, Б.Б. Акбашева, В.Ю. Кириллова, Т.Р. Газизова, С.П. Куксенко, В.И. Петровского, С.Ф. Чермошенцева, Е.И. Грачевой, Г. Отта, Э. Хабигера, А. Шваба и др., но в них не встречается целостного рассмотрения возможности применения физического моделирования. В разработку моделей, методик и применения физического моделирования для решения разных технических задач внесли большой вклад: В.А. Веников, Р.К. Борисов, Е.С. Колечицкий, Е.В. Коломиец, Л.Н. Шувалов, В.Н. Невзоров, З.М. Гизатуллин, Б.Н. Городецкий, Н.Л. Кучин и др. Среди зарубежных исследователей необходимо отметить А.Ж. Stratton, А. Piantini, J.M. Janiszewski, L.K. Augustyniak, R.V. Briet, R. Markowska, A. Sowa, L. Augustyniak, A.M. Ibrahim, F.H. Heidler, W.J. Zischank, S.R. Edison, P.G. Ernesto, H.M. Javier. Однако, как правило, в данных работах физическое моделирование рассматривается применительно к объектам электроэнергетики. Поэтому, актуальной научной задачей является разработка методических основ и развитие математического аппарата физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников.

Цель работы – снижение затрат на прогнозирование помехоустойчивости элементов ВТ в условиях воздействия макроисточников электромагнитных помех путем исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки за счет использования моделей и методики физического моделирования.

Научная задача исследования – разработка научно-обоснованной методики и развитие математического обеспечения физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ.

Решение поставленной задачи и достижение цели диссертационной работы проводится путем исследований по следующим направлениям:

1. Аналитический обзор и выявление актуальности задачи анализа электромагнитных помех в линиях связи и помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии макроисточников электромагнитных помех (разряд молнии, контактная сеть электротранспорта (КСЭ), высоковольтные линии электропередачи или переизлучение через проводящие элементы здания, летательного аппарата, транспортного средства и т.п.).

2. Разработка методики прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников на основе физического моделирования.

3. Разработка физических и математических моделей для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников.

4. Создание стендов для физических экспериментов в уменьшенных масштабах и физическое моделирование электромагнитных помех в линиях связи для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников.

Предполагаемые методы исследования: теория подобия, теория помехоустойчивости, теория антенн, теория вероятности, аналитические математические модели, экспериментальные исследования.

Объектом исследования являются элементы и устройства ВТ и систем управления, линии связи, метод, модели и методика физического моделирования электромагнитных помех.

Предмет исследования – помехоустойчивость элементов и устройств ВТ и систем управления в условиях воздействия макроисточников электромагнитных помех, методика и модели для прогнозирования помехоустойчивости ВТ за счет использования физического моделирования.

Научная новизна.

1. Разработана методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников на основе физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи, позволяющая снизить затраты на прогнозирование за счет исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки.

2. Предложены физические и математические модели для исследования помех в линиях связи, позволяющие прогнозировать помехоустойчивость

элементов ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников.

3. Получены результаты физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ на оригинальных стендах для физических экспериментов в уменьшенных масштабах, позволяющие оценить возможности применения разработанной методики.

Теоретическая значимость полученных результатов.

1. Предложены математические модели для физического моделирования помех в линиях связи, позволяющие прогнозировать помехоустойчивость элементов ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников.

2. Разработана методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников на основе физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи, позволяющая снизить затраты на прогнозирование за счет исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки.

Практическая значимость работы состоит в применении полученных теоретических результатов для снижения материальных и временных затрат на прогнозирование электромагнитных полей, помех в линиях связи и помехоустойчивости элементов: ВТ беспилотных летательных аппаратов при воздействии удаленного разряда молнии или промышленных макроисточников; ВТ автотранспортных средств при воздействии промышленных макроисточников; ВТ внутри здания при воздействии разряда молнии; ВТ внутри здания при воздействии преднамеренных источников на металлоконструкции и др. Результаты исследования использованы при выполнении: проекта РФФИ на тему «Моделирование электромагнитных полей на макрообъектах на основе теории масштабного физического эксперимента» («мол_а» №НК14-01-31098, 2014-2015 гг.); государственного контракта 2.1724.2017/4.6 на тему «Исследование путей создания программно-аппаратного комплекса беспилотного летательного аппарата для обнаружения и распознавания объектов интереса» для физического моделирования электромагнитных помех в бортовой линии связи ВТ беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (2017-2018 гг.); проекта ФЦП на тему «Сквозная технология обеспечения помехоустойчивости сложных электронных систем внутри зданий при внешних электромагнитных воздействиях» (№14.740.11.1014, 2011-2013 гг.).

Достоверность научных результатов базируется на выборе формальных методов исследований, на согласованности результатов расчета и физического моделирования электромагнитных помех, на построении адекватных математических моделей, на опыте использования полученных научно-технических результатов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены и использованы: в ООО «СтройМонтаж-Инжиниринг» (г. Казань) для приближенной оценки магнитного поля внутри здания при воздействии разряда молнии на систему молниезащиты. А также используются в учебном процессе кафедры «Системы автоматизированного проектирования» КНИТУ-КАИ (г. Казань) и Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (г. Томск).

На защиту выносятся:

1. Методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников на основе физического моделирования помех в линиях связи снижает затраты на прогнозирование за счет исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки.

2. Физические модели и их математическое обеспечение для исследования помех в линиях связи позволяют прогнозировать помехоустойчивость элементов ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников.

3. Результаты физического моделирования помех в линиях связи ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников, полученные путем использования оригинальных стендов для физических экспериментов в уменьшенных масштабах, позволяют оценить возможности применения разработанной методики.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 Международных и 3 Российских симпозиумах и конференциях. В том числе, на Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, 2018), «Динамика систем, механизмов и машин» (г. Омск, 2017), «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, 2017), «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности» (г. Казань, 2014) и др.

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 22 печатных работах, в том числе в 7 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в пяти статьях и трудах конференций, входящих в базу научного цитирования Scopus, в одной монографии и 9 научных докладах.

Личный вклад автора заключается в разработке научно-обоснованной методики прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников на основе физического моделирования; в развитии математического обеспечения физического моделирования помех в линиях связи ВТ; в создании стендов для физических экспериментов в уменьшенных масштабах и физическом моделировании помех в линиях связи при воздействии различных электромагнитных макроисточников.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» по п. 2. «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств ВТ и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Работа выполнена на 141 странице, содержит 105 страниц текста, 52 рисунка и 22 таблицы, библиографический список из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи разработки методики и развитие математического аппарата физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи для снижения затрат на прогнозирование помехоустойчивости элементов ВТ путем исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки. Описываются объект, предмет и предполагаемые методы исследования. Формулируется цель работы, описывается структура и содержание диссертации по главам.

В первой главе проведен анализ параметров макроисточников электромагнитных помех. Определены основные причины нарушения помехоустойчивости элементов ВТ, в рамках установленных нормативными документами критериев качества функционирования. Выполнена постановка задачи, сформулированы ограничения и допущения работы.

Базовые выражения, определяющие критерии подобия при протекании электромагнитных процессов, представлены в научно-технической литературе. Рассматривая уравнения Максвелла для электрического (E) и магнитного (H) поля в определенной среде с проводимостью σ , диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ , масштабные коэффициенты для геометрических размеров (k_l), времени (k_t), электрического поля (k_E) и магнитного поля (k_H) определяются как: $k_l = x'/x = y'/y = z'/z$, $k_t = t'/t$, $k_E = E'/E$, $k_H = H'/H$, где x , y и z относятся к системе координат, t представляет время, а индекс «'» относится к масштабным переменным модели. В реальных условиях проведения физического моделирования обычно придерживаются единичных значений масштабных коэффициентов диэлектрической и магнитной проницаемости $k_\epsilon = 1$, $k_\mu = 1$. Тогда, согласно условиям $k_l k_\sigma k_\mu = 1$, $k_H = k_E \sqrt{k_\sigma k_l / k_\mu}$, коэффициент масштабирования проводимости равняется $k_\sigma = 1/k_l$. Поэтому, в идеальном случае, масштабирование активного сопротивления осуществляется путем замены материала оригинала другим материалом, с проводимостью, отличающейся в k_σ раз. Но в тоже время, в научной литературе имеются сведения, что пропорциональное изменение физических размеров модели, при сохранении ее характеристик по электрической и магнитной проницаемости, приводит к пропорциональному изменению величин всех индуктивностей и емкостей. Поэтому считается, что для задач, где активное сопротивление сравнительно мало именно индуктивности и емкости являются определяющими при формировании электромагнитных процессов [Johnson H., Graham M. High Speed Signal Propagation. Advanced Black Magic. New Jersey: Prentice Hall, 2003. 766 p].

Во второй главе предложены физические и математические модели электромагнитных помех в линиях связи, разработана методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ на основе физического моделирования.

В диссертационной работе рассмотрены математические модели и проведен анализ параметров макроисточников электромагнитных помех, которые представляют угрозу для помехоустойчивости элементов ВТ: прямой и удаленный разряд молнии; КСЭ; высоковольтная линия электропередачи; электромагнитный импульс ядерного взрыва. Основными «приёмниками» электромагнитных помех в составе ВТ являются линии связи, преимущественно выполненные в виде двухпроводной системы или в виде витой пары.

В табл. 1 предложены модели и представлены примеры расчета вторичных масштабных коэффициентов для физического моделирования электромагнитных помех в двухпроводной линии связи ВТ при воздействии магнитного или электрического поля различных макроисточников. В диссертационной работе также рассмотрены модели для физического моделирования электромагнитных помех в других типах линий связи ВТ, и при воздействии электрического поля различных макроисточников.

Таблица 1

Математические модели и примеры расчета параметров модели

Физическая величина	Математические модели для физического моделирования	Примеры расчета параметров модели
Геометрические размеры (l)	$l' = k_l l$	$k_l = 1/10$
Время (t)	$t' = k_t t$	$k_t = 1/10$
Напряжённость магнитного $H(t)$ и электрического поля $E(t)$ источника	$H'(t') = k_H H(t),$ $E'(t') = k_E E(t)$	$k_H = 1/100,$ $k_E = 1/50$
Напряжение наведенной помехи на контур при влиянии магнитного поля ($U_n(t)$)	$U'_n(t') = \mu_0 a' b' \frac{dH'(t')}{dt'} =$ $= \mu_0 k_l^2 ab \frac{k_H}{k_t} \frac{dH(t)}{dt},$ где a, b – размеры контура.	$U'_n(t') = \frac{1}{1000} U_n(t)$
Напряжение помехи в двухпроводной линии при влиянии электрического поля ($U_E(t)$)	$U'_E(t') = 2C' a' b' R_n \frac{dE'(t')}{dt'} =$ $= 2k_l C k_l^2 ab R_n \frac{k_E}{k_t} \frac{dE(t)}{dt},$ где C – внутренняя емкость линии; R_n – нагрузка.	$U'_E(t') = \frac{1}{500} U_E(t)$

В следующем разделе диссертационной работы разработана методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии различных макроисточников электромагнитных помех на основе физического моделирования (рис. 1).



Рис. 1. Методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ на основе физического моделирования

Методика содержит две основные части: этапы физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников; методы для прогнозирования помехоустойчивости цифровых элементов ВТ при воздействии моделируемых электромагнитных помех, в соответствие с установленными критериями качества функционирования. Применение данной методики снижает затраты на прогнозирование помехоустойчивости элементов ВТ путем исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки. Если в методике прогнозируется повреждение, временное нарушение или недопустимый уровень вероятности нарушения помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии макроисточников электромагнитных помех, то необходимо вернуться в первый пункт и выбрать другие параметры объекта исследования, элементов, в том числе защитных, и линий связи ВТ, которые позволяют уменьшить уровень электромагнитных помех. Таким образом, данная методика позволяет на этапе разработки учесть возможные последствия воздействия электромагнитных помех, принять необходимые меры и с меньшими затратами создавать ВТ с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками с точки зрения помехоустойчивости. Подробное описание содержания пунктов разработанной методики представлено в диссертационной работе. Непосредственная реализация пунктов методики для ряда практических задач наиболее наглядно представлена в следующем разделе работы.

Важным вопросом применимости представленной методики является адекватность и погрешность использования физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников. В идеальном случае, при соблюдении всех условий теории подобия, погрешность результатов физического моделирования определяется только диапазоном неопределенности параметров генераторов, имитирующих магнитные поля макроисточников; условиями их подключения к объекту исследования; расхождением расчетных масштабных и экспериментальных значений параметров; погрешностью измерительных приборов в необходимом частотном диапазоне. По оценке автора, погрешность физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии прямого разряда молнии не превышает 30%; для удаленного воздействия разряда молнии, КСЭ и преднамеренного источника тока не более 20%. В целом, данная оценка совпадает со сводными результатами исследования научно-технической литературы в аспекте погрешности физического моделирования аналогичных задач.

В третьей главе созданы стенды для физических экспериментов в уменьшенных масштабах и проведен обоснованный выбор оборудования для физического моделирования помех в линиях связи ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников. Предложены методы для прогнозирования помехоустойчивости цифровых элементов ВТ при воздействии моделируемых электромагнитных помех, в соответствие с установленными критериями качества функционирования. Представлены примеры прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ на основе

физического моделирования, которые позволяют оценить возможности применения разработанной методики.

Для реализации физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников важным является разработка стендов и выбор оборудования для проведения масштабных экспериментов, которые по размерам и параметрам удовлетворяют исследователя. Фотографии и схема стенда для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии магнитного поля удаленного разряда молнии и КСЭ представлена на рис. 2. Линии связи находятся внутри исследуемого объекта, например фюзеляжа БПЛА или кузова автомобиля. Для создания магнитного поля используется генератор тока и одновитковая катушка со сторонами 1 м (рабочий объем $0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \text{ м}^3$). Максимальный размер масштабной модели исследуемого объекта не превышает 0,6 м. В качестве измерительного прибора используется цифровой осциллограф Tektronix TDS 2022B.

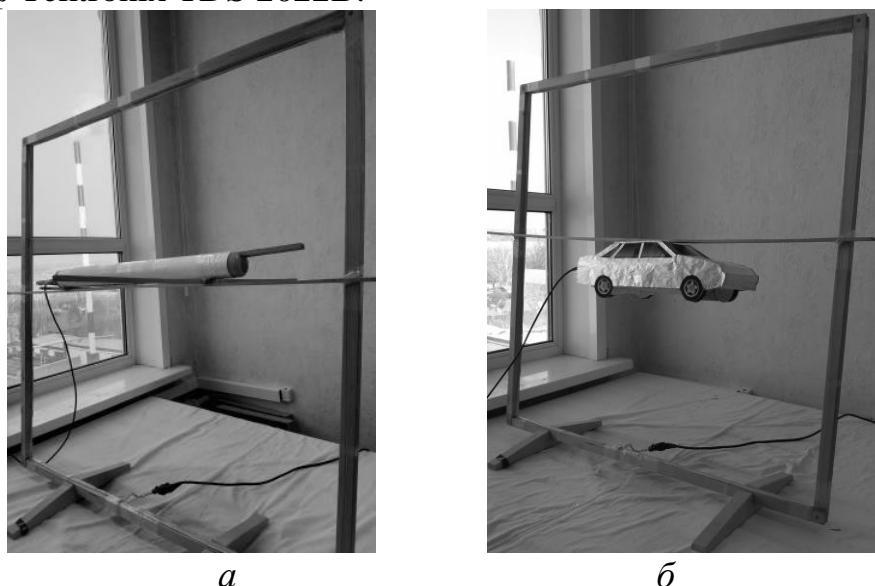


Рис. 2. Стенд для физического моделирования (*а* – фотография с моделью БПЛА; *б* – фотография с моделью автомобиля)

Также созданы стенды для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ внутри здания при воздействии преднамеренного источника тока на систему отопления и прямом воздействии разряда молнии на систему молниезащиты. В первом случае импульсный источник тока подключается параллельно между подающим и обратным трубопроводами системы отопления, во втором к молниеприемнику.

Для прогнозирования качества функционирования цифровых элементов ВТ при воздействии моделируемых электромагнитных помех предложены следующие методы: расчет энергии электромагнитных помех и сравнение с критериями повреждения элементов ВТ; сравнение амплитуды и длительности электромагнитных помех со статической и динамической помехоустойчивостью элементов ВТ; вероятностный метод прогнозирования нарушения помехоустойчивости ВТ, определяемый как вероятность ошибки бита и ошибки передачи пакета данных в ВТ. Значения критических уровней

энергии электромагнитных помех, которые могут привести к повреждению элементов ВТ, уровни статической и динамической помехоустойчивости цифровых элементов представлены в научно-технической литературе. Для проведения вероятностной оценки помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных помех макроисточников применяется известный метод, основанный на расчете вероятности ошибки единичного информационного бита и вероятности сбоя всего пакета данных в зависимости параметров помехи и информационных сигналов.

В следующем разделе диссертационной работы представлены примеры реализации предложенной методики для решения практических задач прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ: БПЛА при воздействии удаленного разряда молнии и КСЭ; внутри здания при воздействии прямого разряда молнии на систему молниезащиты; автомобиля при воздействии КСЭ; внутри здания при воздействии генератора тока на металлическую систему отопления.

В настоящее время БПЛА переживают интенсивный период развития и применения. Успех их применения связан, прежде всего, с развитием микропроцессорной ВТ, системы управления, навигации, передачи информации, искусственного интеллекта. Одним из важных факторов, влияющих на безопасность полетов данных аппаратов, является поражение магнитным полем удаленного разряда молнии, тем более, в последние годы наметилась тенденция к разработке фюзеляжей из неметаллических материалов, которые имеют невысокие показатели эффективности экранирования электромагнитных полей. Для решения задачи прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ БПЛА при воздействии удаленного разряда молнии предлагается использовать разработанную методику со следующими этапами.

1. Рассматривается БПЛА с фюзеляжем из неэкранирующего материала (например, стеклопластик), как наиболее неблагоприятный случай. «Приемником» электромагнитных помех внутри фюзеляжа БПЛА считается контур длиной 1,5 м, образованный двухпроводной линией (вариант 1, рис. 3, *а*) и витой парой с нагрузкой $R=100$ Ом на обоих концах (вариант 2, 3, *б*).

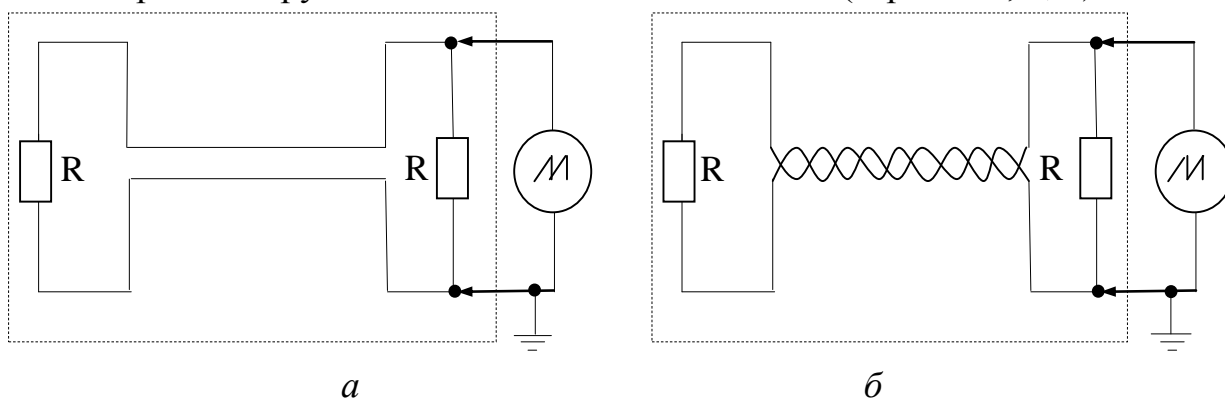


Рис. 3. Линии связи ВТ БПЛА

2. Определяются потенциальные параметры реального магнитного поля удаленного разряда молнии. Например, импульсное магнитное поле в ближней

зоне разряда молнии, представлено на рис. 4, а.

3. Выбираются первичные масштабные коэффициенты физического моделирования: $k_I = 1/3$, $k_H = 1/4$.

4. Выбирается математическая модель, рассчитываются вторичные масштабные коэффициенты для анализа электромагнитных помех в масштабной модели. Для данного примера, имеем следующее выражение: $U(t) = 12U'(3t')$.

5. Рассчитываются параметры магнитного поля удаленного разряда молнии с учетом масштабных коэффициентов (рис. 4, б).

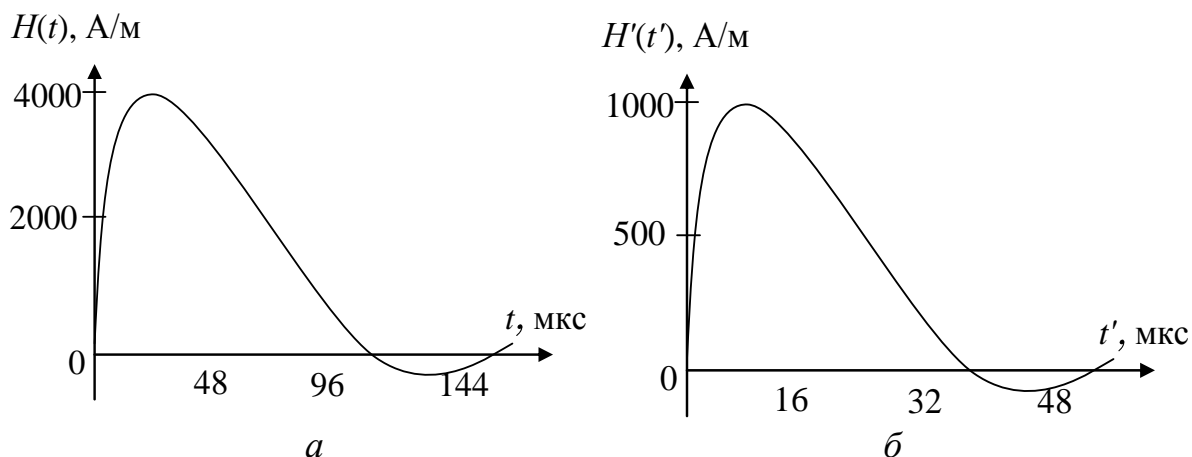


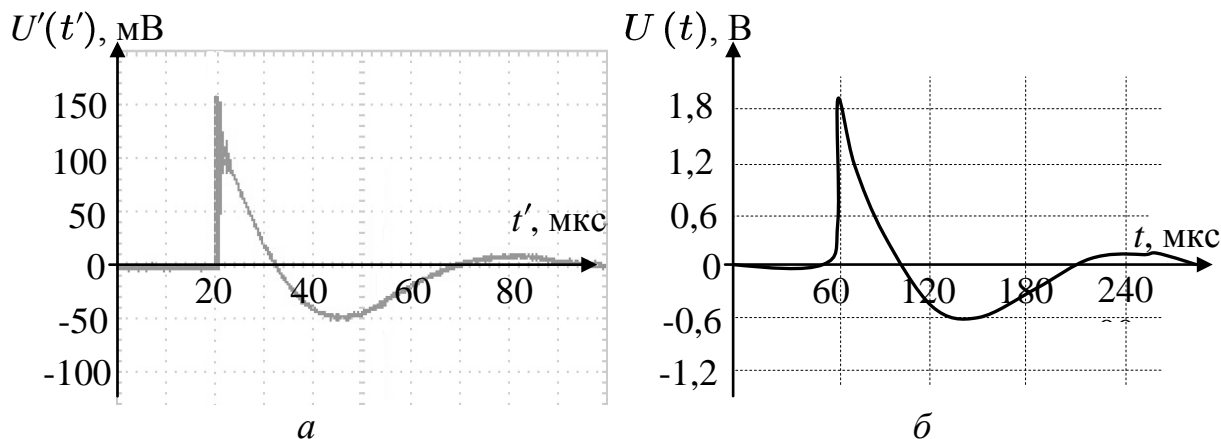
Рис. 4. Импульсное магнитное поле удаленного разряда молнии (а – с реальными параметрами; б – в уменьшенном масштабе)

6. Разрабатывается физическая модель БПЛА с исследуемыми линиями связи ВТ внутри (рис. 2, а).

7. Разрабатывается стенд для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ БПЛА при воздействии удаленного разряда молнии с учетом масштабных коэффициентов (рис. 2, а).

8. В линиях связи внутри масштабной модели БПЛА при воздействии магнитного поля удаленного разряда молнии проводятся измерения осциллограмм электромагнитных помех $U'(t')$ (рис. 5, а, в).

9. Физическое моделирование электромагнитных помех в линиях связи реальной ВТ при воздействии магнитного поля удаленного разряда молнии представлены на рис. 5, б, г.



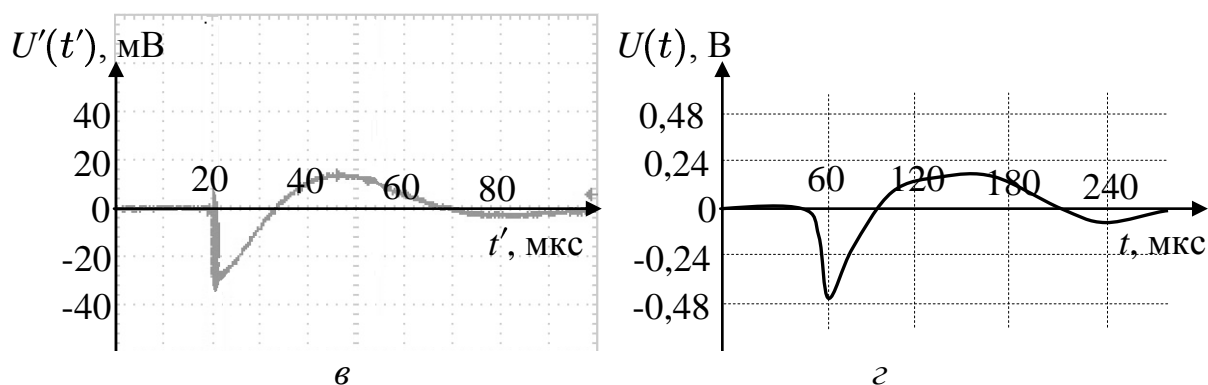


Рис. 5. Электромагнитные помехи в линиях связи БПЛА (а, в – помехи, измеренные на модели, соответственно, варианты 1 и 2; б, г – физическое моделирование помехи, соответственно, варианты 1 и 2)

10. В рассмотренном примере максимальная амплитуда моделируемой электромагнитной помехи в линиях связи достигает 1,8 В, а длительность до 120 мкс. В соответствии с методикой, проведем прогнозирование помехоустойчивости элементов ВТ:

- энергия электромагнитных помех не превышает 10^{-7} Дж, что не может привести к повреждению основных типов элементов ВТ, т.е. нарушение функционирования ВТ по критерию качества функционирования «D» отсутствует;

- считаем, что длительность моделируемой электромагнитной помехи больше длительности информационных сигналов. Поэтому, необходимо сравнить амплитуду электромагнитных помех с уровнем статической помехоустойчивости элементов ВТ. Результаты сравнения указывают, что для определенных типов цифровых элементов может произойти ложное переключение. Данное явление может привести к нарушению функционирования элементов ВТ по критерию «B» или «C»;

- для проведения вероятностной оценки нарушения помехоустойчивости элементов ВТ рассмотрим систему управления БПЛА, где применяется: один элемент-передатчик, три элемента-приемника; линия связи на основе витой пары; длина линии связи между элементом-передатчиком и приемниками, соответственно 0,5 м, 1 м, 1,5 м; амплитуда и длительность информационных сигналов $U_s=2,5$ В, $T_s=50$ нс; временная форма электромагнитной помехи – рис. 5, г; частота повторения импульсных помех $f = 100$ Гц (максимальная частота повторения многократного удара молнии); количество информационных битов в пакете данных $N=1000$. При рассмотренных исходных данных, вероятность нарушения помехоустойчивости системы управления БПЛА при воздействии рассмотренной электромагнитной помехи составляет: $P_{ocs}(z) = 8,82 \cdot 10^{-4}$. Если, данный уровень вероятности нарушения помехоустойчивости элементов является неприемлемым для данного объекта, то необходимо вернуться в первый пункт методики и выбрать другие параметры объекта исследования, элементов и линий связи ВТ, которые позволяют уменьшить уровень помех. Также могут применяться дополнительные, известные и новые специальные способы и устройства для снижения электромагнитных помех.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

В приложении приведены акты внедрения результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен аналитический обзор задач помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии макроисточников электромагнитных помех. Выявлена актуальность исследований, заключающейся в необходимости снижения материальных и временных затрат, связанных с полномасштабными исследованиями электромагнитных помех в линиях связи при воздействии электромагнитных макроисточников для прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ на этапе разработки. При этом, в существующей научно-технической литературе недостаточно представлены методические и математические основы физического моделирования электромагнитных помех применительно к поставленным задачам.

2. Разработана научно-обоснованная методика прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ содержащая две основные части: этапы физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников; методы, позволяющие прогнозировать помехоустойчивость элементов ВТ, в соответствие с установленными критериями качества функционирования, при воздействии моделируемых помех. Применение данной методики снижает затраты на прогнозирование помехоустойчивости элементов ВТ путем исключения полномасштабных экспериментальных исследований на этапе разработки, что в итоге позволяет заранее принять необходимые меры защиты от помех и создавать устройства с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками с точки зрения помехоустойчивости.

3. Предложены физические и математические модели позволяющие использовать физическое моделирование для анализа электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии различных электромагнитных макроисточников. По литературным источникам и оценкам автора, погрешность физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии рассматриваемых электромагнитных макроисточников не превышает 30%.

4. Созданы стенды для физических экспериментов в уменьшенных масштабах и проведен обоснованный выбор оборудования для физического моделирования электромагнитных помех в линиях связи ВТ при воздействии рассматриваемых электромагнитных макроисточников. Представлены примеры прогнозирования помехоустойчивости элементов ВТ при воздействии электромагнитных макроисточников на основе физического моделирования электромагнитных помех, которые позволяют оценить возможности применения разработанной методики.

5. Перспективным направлением использования методики прогнозирования помехоустойчивости ВТ на основе физического моделирования является проведение исследований с соблюдением требований к испытаниям

технических средств на помехоустойчивость при воздействии различных электромагнитных помех, в соответствии с государственными стандартами. Кроме рассмотренных в данной работе электромагнитных помех, наиболее эффективным видится возможность применение данной методики при воздействии электромагнитного импульса ядерного взрыва, т.к. требования испытаний технических средств на данное воздействие являются наиболее масштабными и достаточно сложными вне специализированных полигонов.

6. Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых публикациях. Основные результаты исследования внедрены в учебный процесс в технических университетах и промышленность, что подтверждается актами внедрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Нуриев М.Г. Физическое моделирование электромагнитных помех для прогнозирования помехоустойчивости бортовой вычислительной техники БПЛА // Технологии электромагнитной совместимости. 2019. №1. С. 41-51.

2. Нуриев М.Г. Прогнозирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата на основе физического моделирования // Труды МАИ. 2018. №102. Режим доступа: http://trudymai.ru/upload/iblock/e83/Nuriev_rus.pdf?lang=ru&issue=102 (дата обращения 23.11.2018)

3. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников // Радиотехника и электроника. 2018. №1. С. 97-102.

4. Нуриев М.Г., Гизатуллин З.М. Физическое моделирование преднамеренного электромагнитного воздействия на вычислительную технику через металлоконструкции здания // Информация и безопасность. 2017. №3. С. 456-459.

5. Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Методика физического моделирования воздействия разряда молнии на летательные аппараты // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. №2. С. 3-6.

6. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Математические модели для физического моделирования задач электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №1-2. С. 115-122.

7. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М. Физическое моделирование электромагнитных помех при электромагнитном воздействии на макрообъекты // Журнал радиоэлектроники. 2015. №6. С. 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/1/text.pdf> (дата обращения 23.11.2018)

Статьи и труды конференций, индексируемые в Scopus

8. Nuriev M.G., Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M. Physical Modeling of Electromagnetic Interference in Unmanned Aerial Vehicle under Action of the

Electric Transport Contact Network // Russian Aeronautics. 2018. vol. 61. no. 2. pp. 293-298.

9. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Gizatullin R.M. Physical Simulation of Electromagnetic Interference in Electronic Mains under the Effect of Electromagnetic Fields of High-Voltage Power Lines // Russian Electrical Engineering. 2018, vol. 89, no. 5. pp. 328-331.

10. Nuriev M.G., Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Physical Modeling of Electromagnetic Interferences in the Unmanned Aerial Vehicle in the Case of High-Voltage Transmission Line Impact // Russian Aeronautics. 2017. vol. 60. no. 2. pp. 292-298.

11. Nuriev M.G., Gizatullin R.M., Gizatullin Z.M. Physical Modeling of Electromagnetic Interferences in the Electronic Devices at Direct Impact of Lightning on Protection System of Building // Proceedings of the 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894, October 2-6, 2018, Novosibirsk, Russia, pp. 355-358.

12. Gizatullin Z.M., Nuriev M.G., Shleimovich M.P. Physical Modeling of Electromagnetic Interference in Unmanned Aerial Vehicle under Action of Indirect Lightning Strike // 2017 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (Omsk, Russia) 14 Nov-16 Nov 2017, pp. 1-4.

Монография

13. Гизатуллин З.М., Нуриев М.Г. Прогнозирование помехоустойчивости вычислительной техники на основе физического моделирования: монография. – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2019. 140 с.

Работы, опубликованные в других изданиях

14. Нуриев М.Г., Салимов Р.И. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств автомобиля при воздействии контактной сети электротранспорта // Перспективные информационные технологии: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017, С. 677-680.

15. Нуриев М.Г., Салимов Р.И. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств автомобиля при воздействии высоковольтных линий электропередачи // Перспективные информационные технологии: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017, С. 681-684.

16. Салимов Р.И., Нуриев М.Г. Моделирование электромагнитных помех в линиях связи автомобиля при воздействии высоковольтных линий электропередачи // Перспективные информационные технологии: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2017, С. 700-704.

17. Нуриев М.Г., Салимов Р.И. Физическое моделирование воздействия масштабного преднамеренного электромагнитного импульса // Наука в движении: от отражения к созданию реальности: материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Издательство «Перо», 2017. С. 121-124.

18. Нуриев М.Г., Салимов Р.И. Методика физического моделирования помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии контактной сети электротранспорта // Наука в движении: от отражения к созданию реальности: материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Издательство «Перо». 2016. С. 79-83.

19.Нуриев М.Г., Симаков А.В. Методика физического моделирования помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии высоковольтных линий электропередачи // Наука в движении: от отражения к созданию реальности: материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Издательство «Перо», 2016. С.76-79.

20.Нуриев М.Г., Мингалиева Р.М., Назметдинов Ф.Р., Гизатуллин З.М. Физическое моделирование помехоустойчивости беспилотного летательного аппарата при воздействии контактной сети электротранспорта // Перспективы развития науки, техники и технологий: сб. научн. статей 6-й Междунар. научно-техн. конф. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2016. С. 89-92.

21.Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М., Нуриев М.Г. Физическое моделирование воздействия разряда молнии на летательные аппараты // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. С. 254-257.

22.Нуриев М.Г. Физическое моделирование задач электромагнитной совместимости вычислительной техники // XXII Туполевские чтения: сб. матер. Междунар. науч. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2015. С. 129-134.

Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать ризографическая.

Усл. печ. л. _____. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Министерство образования и науки РТ

Редакционно-издательский центр «Школа».

420111, Казань, Дзержинского, 3. Тел. сот.: 8-9172-64-84-83

Отпечатано на множительном участке центра.