

Акционерное общество
«Российская корпорация ракетно-космического
приборостроения и информационных систем»
(АО «Российские космические системы»)

Авиамоторная ул., д. 53, Москва, 111250
Тел.: (495) 509-12-01, факс: (495) 509-12-00, e-mail: contact@spacecorp.ru
ОКПО 11477389, ОГРН 1097746649681, ИНН 7722698789, КПП 774850001

03.11.2017 г. № И-09/988

На № _____ от _____

Экз. № 2

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по науке
доктор технических наук, профессор



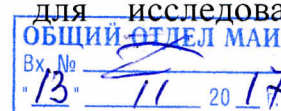
А.А. Романов

2017 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу
соискателя ученой степени доктора технических наук по специальностям
05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и
05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов» (технические науки) Важенина Николая
Афанасьевича, выполненную на тему: «Повышение помехоустойчивости
радиосистем космической связи при воздействии радиоизлучения
стационарных плазменных двигателей», представленную к защите в
диссертационный совет Д 212.125.03 при Московском авиационном институте
(государственном техническом университете).

Диссертационная работа Важенина Николая Афанасьевича «Повышение
помехоустойчивости радиосистем космической связи при воздействии
радиоизлучения стационарных плазменных двигателей» носит
междисциплинарный характер, поскольку в ней рассматриваются вопросы
разработки и создания экспериментальных стендов для исследования



характеристик собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, исследуются спектрально-временные характеристики такого излучения и влияние на них режимов работы ЭРД, а также разрабатываются математические и имитационные модели радиоизлучения ЭРД, как помехи для радиосистем космической связи, исследуется влияние радиоизлучения ЭРД на помехоустойчивость таких систем, предлагаются и исследуются новые методы повышения помехоустойчивости в этих условиях.

Актуальность темы выполненной работы

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) являются источниками электромагнитного излучения в радиодиапазоне, которое имеет шумоподобный характер и недостаточно изученную спектрально-временную структуру. При определенных условиях это излучение может существенно повлиять на энергетический потенциал и характеристики помехоустойчивости радиолиний космической связи «Земля-КА».

В связи с этим актуальным является исследование характеристик и разработка математических моделей радиоизлучения, возникающего при работе ЭРД, в частности таких широко распространенных на практике, как стационарные плазменные двигатели (СПД), анализ влияния этого излучения на характеристики помехоустойчивости радиосистем космической связи и разработка методов ее повышения в этих условиях.

Научная новизна исследования

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны и апробированы принципы построения экспериментальных стендов для исследования собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, которые реализованы при создании многофункционального экспериментального стенда НИИ ПМЭ МАИ, позволяющего исследовать помехоэмиссию различных типов ЭРД мощностью до 20 кВт.

2. Разработан комплекс методов, математических моделей, аппаратно-программных и программно-алгоритмических средств, а также технических

решений для экспериментального исследования характеристик радиоизлучения стационарных плазменных двигателей в наземных условиях и анализа влияния этого излучения на помехоустойчивость радиосистем космической связи с космическими аппаратами (КА), оснащенными ЭРД, позволивший впервые получить количественные оценки помехоустойчивости в этих условиях и разработать методы ее повышения.

3. Экспериментально установлено, что радиоизлучение СПД, кроме тепловой компоненты, может иметь выраженную импульсную компоненту, представляющую собой случайную последовательность широкополосных радиоимпульсов. Показано, что статистические и энергетические характеристики этой последовательности, исследованные в работе, зависят от типа СПД, режима его работы и рассматриваемого частотного диапазона.

4. Экспериментально определена спектрально-временная структура и параметры излучения СПД в радиодиапазоне, на основе проведенных экспериментальных исследований и их статистической обработки сформирована информационная база данных спектрально-временных характеристик радиоизлучения для различных типов СПД и их интегральных параметров, необходимая для разработки и реализации математических и имитационных моделей такого излучения.

5. Разработана и апробирована методика обработки результатов экспериментальных измерений для определения характеристик структурных составляющих излучения СПД в радиодиапазоне, включающих тепловую и нетепловую компоненты излучения, и их количественных параметров.

6. Исследовано влияние на характеристики излучения СПД его функциональных и конструктивных элементов. Установлено, что электродинамические процессы в катод-компенсаторе на основе полого катода являются одной из причин возникновения нетеплового излучения СПД в радиодиапазоне. Показано, что результаты измерения текущих параметров радиоизлучения СПД могут быть использованы для контроля состояния и оптимизации параметров работы СПД.

7. Разработаны и апробированы обобщенные математические модели излучения СПД в радиодиапазоне: на основе модифицированной модели Фурутсу-Ишида и на основе моделей Холла и стробированного гауссовского шума. Для их реализации разработаны методы и алгоритмы имитационного моделирования радиоизлучения СПД, позволяющие создавать программные и аппаратные имитаторы радиоизлучения СПД, которые могут быть использованы как для исследования помехоустойчивости радиосистем космической связи, так и при проведении наземных испытаний бортового оборудования КА.

8. Проведено и апробировано обобщение модели Миддлттона класса А при совместном воздействии белого гауссовского шума и случайных импульсных помех для асимптотического случая импульсной помехи с длительностью импульса много меньше длительности канального символа для анализа помехоустойчивости радиосистем космической связи (РСКС) в условиях воздействия радиоизлучения СПД.

9. Для типовых методов фазовой и амплитудно-фазовой модуляции ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16, КАМ-16, КАМ-64, используемых в РСКС, получены количественные оценки зависимости вероятности битовой ошибки и энергетического проигрыша радиосистем космической связи от отношения сигнал-шум, отношения сигнал-импульсная помеха и временных параметров импульсного излучения используемых и перспективных моделей СПД.

10. Разработаны новые методы и алгоритмы их реализации для борьбы с влиянием импульсной составляющей излучения СПД, основанные на адаптивном выделении и квадратурной компенсации таких помех. По сравнению с типовым алгоритмом ШОУ («широкая полоса – ограничитель – узкая полоса»), предложенные методы обеспечивают энергетический выигрыш от 1.5 до 5 дБ.

11. Для оптимизации работы квадратурного компенсатора импульсных помех разработаны новые алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия импульсных помех, которые являются

работоспособными в широком диапазоне отношений сигнал-шум и сигнал-импульсная помеха, а при отношении сигнал-шум более 5 дБ обеспечивают точность оценки не хуже 10...20%.

Достоверность и практическая значимость результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается корректным использованием методов теории вероятностей и математической статистики, строгим использованием математического аппарата для всех полученных научных результатов, соответствием в определенных случаях полученных результатов результатам других авторов, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе, масштабной экспериментальной проверкой предложенных математических моделей и совпадением в частных случаях результатов имитационного моделирования на ЭВМ с известными аналитическими решениями, а также использованием измерительных средств и оборудования, прошедших своевременную поверку и метрологическую аттестацию.

Практическая значимость результатов работы характеризуется их использованием при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в частности, с ОАО «ИСС им. акад. М.Ф. Решетнева», ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», ФГУП «ЦНИИмаш», МНИИПУ, НИИ ПМЭ МАИ. Внедрение результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами.

Новизна предложенных и исследованных в диссертационной работе технических решений подтверждается 2 патентами РФ на полезную модель, 2 патентами РФ, 3 патентами США и 1 патентом ЕС на изобретение, полученными с участием автора.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Полученные автором результаты и разработанные математические модели, алгоритмы и технические решения могут быть использованы при проектировании и разработке радиосистем связи с КА, оборудованными ЭРД, в частности с КА дальнего космоса.

Структура и содержание работы

Представленная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованных источников и 3 приложений.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, определены цель работы и решаемые научно-технические задачи. Приведены научная новизна и практическая ценность работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ особенностей и основных направлений использования ЭРД в задачах освоения ближнего и дальнего космоса, дано систематизированное описание типов ЭРД, принципов их функционирования, основных характеристик и тенденций развития. Проанализированы виды воздействия ЭРД на радиосистемы КА и выделены основные факторы, влияющие на качество функционирования РСКС. Проведен анализ РСКС ближнего и дальнего космоса, определены и систематизированы их основные характеристики и параметры, такие как: диапазоны используемых частот, методы модуляции и кодирования, энергетические характеристики и т.п., необходимые для последующего анализа помехоустойчивости РСКС.

Во второй главе рассмотрены нормативно-метрологические и методические основы проведения экспериментальных исследований и моделирования излучения ЭРД, проведен анализ современного состояния экспериментальных установок и методов измерения характеристик излучения ЭРД, систематизированы основные известные результаты измерения характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне. Приведено описание аттестованной комбинированной экспериментальной установки НИИ ПМЭ МАИ с подвижной безэховой камерой (БЭК), на которой в наземных условиях проводились основные экспериментальные исследования и измерения характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне. Разработана и апробирована методика проведения экспериментальных измерений характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне, включающая методы и порядок измерений, процедуры калибровки измерительного комплекса, математическое обеспечение и

программные средства для обеспечения проведения, обработки и интерпретации результатов экспериментальных измерений.

В третьей главе приводятся и анализируются основные полученные результаты экспериментальных измерений спектрально-временных характеристик собственного излучения ЭРД в радиодиапазоне, выполненных для лабораторных моделей ЭРД типа СПД-70, СПД-100, СПД-140, ВЧИД-10 и АИПД-50, а также для исследования излучения полого катода, с использованием разработанных методики и аппаратно-программного комплекса, описанных в Главе 2.

Четвертая глава посвящена анализу статистических характеристик и математических моделей радиоизлучения СПД в частотной и временной областях. Рассматриваются феноменологические модели собственного электромагнитного излучения ЭРД различного уровня детализации. Предложены и исследованы две обобщенные математические модели излучения СПД в радиодиапазоне: первая - на основе модифицированной модели Фурутсу-Ишида, а вторая - на основе моделей Холла и стробированного гауссовского шума, позволяющие формировать реализации случайных процессов, статистически эквивалентные реальному излучению СПД в радиодиапазоне.

В пятой главе рассматриваются архитектура и алгоритмы реализации программного комплекса для имитационного моделирования излучения СПД в радиодиапазоне, проводится верификация разработанного программно-алгоритмического комплекса для имитационного моделирования излучения СПД в радиодиапазоне. Проводится верификация программного комплекса для имитационного моделирования радиоизлучения СПД в радиодиапазоне на основе сравнения статистических характеристик реализаций сигналов, полученных при экспериментальных измерениях и при имитационном моделировании.

Шестая глава посвящена анализу возможности использования аналитических моделей для исследования влияния радиоизлучения ЭРД на

достоверность передачи информации в РСКС и разработке имитационных моделей РСКС, включающих, кроме информационного канала, также каналы фазовой и символьной синхронизации. Разработаны и сформулированы общие принципы имитационного моделирования РСКС в условиях совместного воздействия аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и излучения ЭРД. Разработан специализированный программно-алгоритмический комплекс для имитационного моделирования РСКС и исследования характеристик передачи информации с учетом совместного воздействия АБГШ и радиоизлучения СПД не только на информационный канал, но и на каналы фазовой и символьной синхронизации.

Седьмая глава посвящена исследованию влияния радиоизлучения СПД на вероятность битовой ошибки при передаче информации в РСКС и анализу зависимости энергетического проигрыша от параметров радиоизлучения СПД. Анализ проводился применительно к РСКС с методами модуляции ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16, КАМ-16 и КАМ-64. Для оценки помехоустойчивости функционирования системы связи в условиях совместного воздействия АБГШ и импульсного излучения СПД в качестве эталонной системы связи рассматривается система с помехой только в виде АБГШ, описывающего тепловой шум приемного тракта. Полученные результаты позволяют количественно оценивать достоверность передачи информации и энергетический проигрыш РСКС при воздействии радиоизлучения СПД для широкого круга условий функционирования и параметров радиолинии.

В восьмой главе проводится исследование влияния предложенных методов квадратурной компенсации воздействия импульсной компоненты радиоизлучения СПД на помехоустойчивость РСКС, анализируются новые методы оценки текущих значений отношения сигнал-шум (ОСШ), в том числе и при воздействии радиоизлучения СПД, обеспечивающие реализацию адаптивного режима компенсации.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Замечания по работе

1. Недостаточно подробно описана внутренняя модуляционная структура радиоимпульсов, излучаемых СПД и её параметры, полученные на основе обработки результатов экспериментальных измерений.


2. Вопросы аппаратно-программной реализации имитатора радиоизлучения СПД рассмотрены излишне конспективно и в основном с точки зрения программно-алгоритмической реализации.

3. При получении оценок достоверности передачи информации, анализе помехоустойчивости и формировании оценок текущего отношения сигнал-шум не учитывалось влияние фазовых шумов, которое может быть существенным при использовании многопозиционных методов модуляции.

В целом, несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Важенина Николая Афанасьевича «Повышение помехоустойчивости радиосистем космической связи при воздействии радиоизлучения стационарных плазменных двигателей» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научно-техническая проблема повышения качества и эффективности функционирования радиосистем космической связи при воздействии радиоизлучения стационарных плазменных двигателей КА, и по своей актуальности, объему проведенных исследований, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (ред. от 28.08.2017), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а её автор достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (технические науки).

Отзыв обсужден и одобрен на заседании отделения создания специальных наземных комплексов АО «Российские космические системы», протокол № 07/10-2017 от 31 октября 2017 года.

Директор проектов - заместитель генерального конструктора
доктор технических наук, профессор



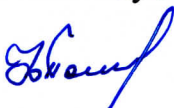
Григорий Григорьевич Ступак

Начальник отделения создания специальных наземных комплексов
доктор технических наук, профессор



Владимир Михайлович Ватутин

Заместитель начальника отделения создания специальных наземных комплексов кандидат технических наук



Юрий Иванович Полтавец

Ученый секретарь
кандидат технических наук, старший научный сотрудник



Сергей Анатольевич Федотов