

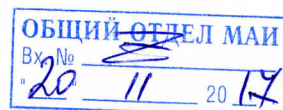
## О Т З Ы В

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

### **Актуальность темы выполненной работы**

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) уже достаточно давно успешно используются и хорошо себя зарекомендовали в задачах освоения ближнего и дальнего Космоса. В тоже время развитие и совершенствование космических аппаратов (КА) ставит задачи увеличения мощности и других эксплуатационных характеристик ЭРД. При этом необходимо учитывать, что как показывают экспериментальные измерения, ЭРД, в частности стационарные плазменные двигатели (СПД), являются источниками широкополосного электромагнитного излучения в радиодиапазоне, которое имеет шумоподобный характер и сложную спектрально-временную структуру. При определенных условиях это излучение может существенно повлиять качество функционирования аппаратуры космического аппарата, в том числе радиолиний космической связи «Земля-КА».

Существует проблема корректного измерения электромагнитного излучения ЭРД и плазменных струй в радиодиапазоне, поскольку известные методы и подходы для измерения радиоизлучения, применяемые, например, для антенных комплексов космических аппаратов, не могут быть непосредственно использованы применительно к электроракетным двигателям. Поскольку в наземных условиях испытания ЭРД происходят в металлических вакуумных камерах, которые являются резонаторами для электромагнитного шума, и в объеме которых распространяется плазменная струя, влияющая на генерацию и распространения радиоизлучения, невозможно непосредственно использовать стандартные методики испытаний по измерению излучения и определению электромагнитной совместимости ЭРД с системами КА.



В связи с этим актуальным является создание специализированного испытательного стенда и методологии испытаний, позволяющих получить наиболее достоверные данные об излучении ЭРД, экспериментальное исследование характеристик радиоизлучения, возникающего при работе различных ЭРД в различных режимах, получение количественных оценок влияния данного излучения на характеристики помехоустойчивости радиолиний космической связи «Земля-КА» и разработка методов повышения помехоустойчивости в этих условиях.

Решению этой проблемы и посвящена рассматриваемая диссертационная работа Важенина Н.А., которая по постановке задачи и своему содержанию носит междисциплинарный характер и соответствует паспортам специальностей 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (технические науки).

### **Содержание диссертационной работы**

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка из 264 использованных источников и 3 приложений.

С точки зрения логической структуры работы она содержит две взаимосвязанные части: первая посвящена созданию специализированного стенда и экспериментальному исследованию характеристик радиоизлучения СПД, анализу влияния на них режимов работы СПД, разработке и верификации математических и имитационных моделей такого излучения, вторая – связана с разработкой математических и имитационных моделей радиосистем космической связи (РСКС), функционирующих в условиях воздействия излучения СПД, количественной оценке и анализу влияния этого излучения на характеристики помехоустойчивости РСКС, а также разработке и исследованию методов борьбы с влиянием импульсной компоненты радиоизлучения СПД.

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

В первой главе проведен анализ основных направлений использования ЭРД в задачах освоения ближнего и дальнего космоса, дано 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 параметров РСКС ближнего и дальнего космоса, необходимых для анализа помехоустойчивости.

Во второй главе проведен анализ современного состояния экспериментальных установок и методов измерения характеристик излучения ЭРД радиодиапазоне. Рассмотрены нормативно-метрологические и методические основы проведения экспериментальных исследований излучения ЭРД, дано описание экспериментальной установки НИИ ПМЭ МАИ, созданной для исследования характеристик ЭРД в наземных условиях, изложена разработанная и апробированная методика проведения экспериментальных измерений характеристик излучения ЭРД в радиодиапазоне, методы и порядок измерений, процедуры калибровки измерительного комплекса, математическое обеспечение и программные средства для обеспечения проведения, обработки и интерпретации результатов экспериментальных измерений. Существенно, что созданный стенд не имеет аналогов в России и является необходимой частью национальной системы испытательных стендов, обеспечивающих исследование и отработку ЭРД в нашей стране.

В третьей главе проводится анализ основных результатов экспериментальных измерений спектрально-временных характеристик собственного излучения ЭРД в радиодиапазоне для лабораторных моделей ЭРД типа СПД-70, СПД-100, СПД-140, ВЧИД-10, АИПД-50 и излучения полого катода, полученных автором с использованием разработанных им методики и аппаратно-программного измерительного комплекса. Следует подчеркнуть, что в диссертации впервые проведено систематическое исследование электромагнитного излучения различных электроракетных двигателей, в том числе, влияние режима работы на характер и уровень излучения, а также показано существенное влияние полого катода-нейтрализатора на характер электромагнитных колебаний, возникающих при работе ЭРД.

Четвертая глава посвящена анализу статистических характеристик и математических моделей радиоизлучения СПД в частотной и временной областях. Рассматриваются феноменологические модели собственного электромагнитного излучения ЭРД в радиодиапазоне. На основе проведенного анализа предложены и исследованы обобщенные математические модели радиоизлучения СПД: на основе модифицированной модели Фурутсу-Ишида и на основе моделей Холла и стробированного гауссовского шума. Данные модели могут найти применение в задачах аналитического проектирования и имитационного моделирования РСКС, а также при создании имитаторов радиоизлучения СПД при наземном тестировании и проверке электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосистем космической связи, функционирующих совместно с ЭРД.

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 на основе сравнения результатов моделирования с результатами соответствующих экспериментальных измерений.

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. Описывается разработанный 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 и анализу зависимости энергетического проигрыша от параметров радиоизлучения СПД. Исследования проводились применительно к РСКС с методами модуляции ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, ФМн-16, КАМ-16 и КАМ-64. 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 на помехоустойчивость РСКС предложенных и защищенных патентами методов борьбы с импульсной компонентой радиоизлучения СПД, анализируются новые методы оценки текущих значений отношения сигнал-шум (ОСШ), в том числе и при воздействии радиоизлучения СПД, обеспечивающие реализацию адаптивного режима работы подавителя помех.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

#### **Достоверность результатов исследования**

Достоверность результатов работы обеспечивается корректным использованием математического аппарата при получении научных результатов, сопоставлением полученных автором результатов с данными, опубликованными в отечественной и зарубежной литературе, экспериментальной проверкой предложенных математических моделей, а также использованием измерительных средств и оборудования, прошедших своевременную поверку и метрологическую аттестацию.

**Научная новизна исследований и полученных результатов** заключается в следующем:

1. Впервые разработан комплекс оборудования, методов, математических моделей, аппаратно-программных и программно-алгоритмических средств, позволяющих наиболее достоверно проводить измерения радиоизлучения электроракетных двигателей в наземных условиях, анализ 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Впервые получены и исследованы 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.

6. Разработаны новые методы и алгоритмы их реализации для борьбы с влиянием импульсной составляющей излучения СПД, основанные на адаптивном выделении и

квадратурной компенсации таких помех. Для оптимизации работы квадратурного подавителя импульсных помех разработаны и исследованы новые алгоритмы оценки текущего отношения сигнал-шум в условиях воздействия импульсных помех.

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.

**Практическая значимость результатов диссертационной работы** определяется тем, что:

1. Разработаны и апробированы принципы построения и создан экспериментальный стенд для исследования собственного радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, позволяющий исследовать помехоэмиссию различных типов ЭРД мощностью до 20 кВт.

2. Исследованы спектрально-временные характеристики радиоизлучения моделей ЭРД (СПД-70, СПД-100, СПД-140, ВЧИД-10, АИПД-50) для различных режимов работы. Экспериментально показано, что минимальный уровень излучения обеспечивается при номинальных режимах работы СПД, а переход к высоковольтным режимам и увеличение расхода рабочего тела могут приводить к увеличению уровня излучения на 10 и более децибел, сформирована необходимая база данных по излучению ЭРД в различных режимах работы, которая позволяет корректно учитывать влияние этого излучения при проектировании КА, оснащенных ЭРД.

3. Экспериментально установлено, что на спектральные и временные характеристики излучения СПД может оказывать существенное влияние длительность его временной наработки, что необходимо учитывать при расчете энергетического потенциала радиолинии космической связи.

4. Разработан имитатор радиоизлучения стационарных плазменных двигателей, алгоритм работы которого базируется на разработанных математических и имитационных моделях радиоизлучения СПД. Имитатор позволяет обеспечить проведение как комплексных наземных испытаний КА, так и исследование влияния излучения СПД на помехоустойчивость конкретных радиосистем космической связи.

5. Разработанные методы, математические модели и алгоритмы доведены до реализации в виде аппаратно-программных и программно-алгоритмических комплексов, которые могут быть использованы в инженерной практике при исследовании характеристик радиоизлучения ЭРД в наземных условиях, проектировании и прототипировании радиосистем космической связи и передачи данных, функционирующих в условиях воздействия радиоизлучения ЭРД.

Результаты экспериментальных измерений радиоизлучения СПД и оценки его влияния на помехоустойчивость РСКС использовались 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.

### **Апробация и публикации результатов диссертационной работы**

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 66 работах, из них – 1 монография, 1 учебное пособие с грифом Минобрнауки, 24 статьи, в том числе 22 - в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, из них 8 - в изданиях, входящих в системы Scopus и Web of Science, сделано 30 докладов на международных и всероссийских конференциях, 9 работ опубликовано без соавторов, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 патента РФ на полезную модель, 2 патента РФ, 3 патента США и 1 патент ЕС на изобретение.

### **Замечания**

1. При описании методологии проведения испытаний ЭРД и измерении радиоизлучения в диссертации недостаточно полно приведены данные о влиянии стендовых систем и кабельной сети на результаты измерений.

2. Результаты исследований радиоизлучения ЭРД, полученные автором, имеют комплексный характер, однако в диссертационной работе они проанализированы, главным образом, с точки зрения влияния на радиосистемы космической связи, и не приведены данные по оценке электромагнитной совместимости с другими системами КА.

### **Заключение**

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы Н.А. Важенина, и не влияют на сделанные автором выводы и рекомендации. Работа, безусловно, представляет собой важный вклад в области создания и применения электроракетных двигателей, текст диссертации хорошо структурирован, экспериментальные результаты получены для широкой и практически значимой области характеристик существующих и перспективных ЭРД.

Анализ материалов диссертационной работы и автореферата показывает, что название диссертационной работы верно отражает ее содержание, а материалы и результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в научных публикациях соискателя. Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы, правильно и полно отражает её содержание и полученные результаты.

В целом, несмотря на отмеченные замечания, 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 помехоустойчивости радиосистем космической связи при воздействии радиоизлучения стационарных плазменных двигателей КА, и по своему содержанию, научной новизне и практической ценности 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».

Официальный оппонент  
доктор технических наук,  
заместитель генерального директора  
ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр  
имени М.В. Келдыша»  
E-mail: a.v.semenkin@yandex.ru

Семёнкин Александр Вениаминович

Подпись Семёнкина А.В. удостоверяю  
Ученый секретарь ГНЦ  
«Исследовательский центр  
имени М.В. Келдыша», к.в.н.



Смирнов Юрий Леонидович

Полное название организации: Государственный научный центр Российской Федерации федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша»

Почтовый адрес: 125438, Россия, Москва, Онежская ул., д. 8,

Телефон: +7 (495) 456-34-77

Официальный сайт: <http://kerc.msk.ru/>

Электронная почта: [kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru)

Семёнкин - 20.11.2017г.