

Акционерное общество  
«Российская корпорация ракетно-космического  
приборостроения и информационных систем»



Авиамоторная, д. 53, Москва, 111250, почтовый адрес: а/я 16, г. Москва, 111250  
тел.: +7 495 673-94-30, факс: +7 495 509-12-00, www.russianspacesystems.ru, contact@spacecorp.ru  
ОКПО11477389 ОГРН1097746649681 ИНН7722698789 КПП774550001

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по науке,  
доктор технических наук, профессор

А.В. Круглов

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

от 18.11.2022 № РКС 9-144

«18» ноября 2022 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Смирнова Андрея Владимировича  
«Исследование и компенсация нелинейных искажений сигнала в  
усилителе мощности», представленной на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 –  
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

#### Актуальность темы исследования

Диссертация Смирнова А.В. посвящена вопросам повышения качественных показателей усилителей мощности радиочастотных сигналов для радиопередающих устройств связи и передачи информации при предъявляемых одновременно высоких требованиях по нескольким показателям: энергетической эффективности, линейности модуляции в выделенной полосе радиочастот, по уровню мешающих непредумышленных помех другим радиоэлектронным средствам в соседних полосах частот в условиях дефицита частотного ресурса. Тенденция увеличения скорости передачи информации в ограниченной полосе радиочастот привела к использованию сигнальных конструкций, которые характеризуются значительным непостоянством амплитудной огибающей во время передачи сообщения (высоким пик-фактором мощности), что значительно усложняет достижение компромисса указанных выше показателей.

Поэтому ранее разработанные методы аналоговой или цифровой линеаризации радиочастотных усилителей мощности оказываются недостаточно эффективными, а задача поиска научного обоснования предельных возможностей предсказывающей цифровой компенсации нелинейных искажений сигнала в таких условиях, решаемая в представленной диссертационной работе, является актуальной.

#### Цель работы

Целью диссертационной работы является обоснование универсальной возможности дальнейшего повышения эффективности цифровой предсказывающей компенсации искажений сигнала в различных усилителях

Вход. № 128/22  
«25» 11 2022  
подпись

мощности за счёт архитектуры цифрового непрямого обучения оператора предсказания в модуляторе.

Для достижения этой цели сформулированы частные задачи:

а) разработка математической модели оценки эффективности цифрового предсказывающего компенсатора произвольных искажений;

б) создание универсального подхода для повышения точности идентификации оператора предсказания;

в) получение предельной оценки сверху возможности цифровой компенсации на основе универсальной трёхзвенной модели Винера-Хаммерштейна (частотный фильтр – нелинейный элемент – частотный фильтр);

г) проверка возможности учёта эффекта памяти в транзисторе за счёт внутренней электронной обратной связи в транзисторной модели усилительного элемента и за счёт тепловой зависимости параметров его эквивалентной схемы от мощности рассеяния.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованной литературы, списка сокращений и обозначений. Имеются четыре приложения: среди них акт о внедрении результатов в АО «НПО Ангстрем», алгоритмы вычислительных процедур и спецификация схемы замещения усилительного элемента.

Во *введении* обоснована актуальность работы, обозначена цель и определены необходимые для её достижения задачи; приведён краткий обзор литературы; сформулированы позиции научной новизны и практической значимости работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В *первом разделе* изложены основные сведения об используемых в современных системах связи сигнальных конструкциях. Выделены сложные сигналы с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением каналов (OFDM-модуляция) и ансамбли сигналов с прямым расширением спектра и кодовым разделением каналов. Показано, что для их корректного описания целесообразно использовать вероятностную модель в виде комплексного узкополосного гауссовского случайного процесса с прямоугольной огибающей спектральной плотности мощности и релейевским законом распределения амплитуд. Отмечено, что такие сигналы характеризуются неравномерностью изменения амплитудной огибающей во времени, достигающей 10 дБ. В этом разделе приведены базовые сведения о типовых схемах построения усилителей мощности с компромиссным достижением высокой линейности и энергетической эффективности (схемы Кана, Дохерти, автоматической регулировки мощности и дефазирования). Показано, что по сравнению с известными техническими решениями в виде отрицательной обратной связи и связи вперёд целесообразно для повышения качественных показателей использовать предсказывающие компенсаторы нелинейных амплитудных и амплитудно-фазовых искажений и учитывать возникающие при этом эффекты памяти.

Во *втором разделе* диссертационного исследования описан оператор видеоеквивалента радиосигнала, искажённого на выходе усилителя мощности. Рассмотрена возможность применения стандартного тестового двухчастотного

сигала с расположением значений частот симметрично относительно центральной частоты выделенной полосы радиочастот. В качестве источников эффекта памяти рассмотрены механизмы: а) электрической внутренней обратной связи в усилительной элементе транзисторе – по его эквивалентной схеме, б) тепловой обратной связи за счёт зависимости параметров активного элемента от мощности рассеяния. Предложено использовать в качестве индикатора уровня нелинейных искажений и эффекта памяти чувствительность мощности помехи к отношению разности частот тестового сигнала к ширине рабочей полосы радиочастот. Приведены выражения для видеоэквивалента радиочастотных искажений в усилителе мощности в виде линейно-параметрической модели.

**Третий раздел** содержит описание процедуры регуляризации задачи нахождения оптимального оператора предсказания при помощи метода А.Н. Тихонова с учётом усечения рядов Вольтерры во времени и по степени полинома для снижения погрешностей идентификации и для устранения расходимости результатов решения так называемой «некорректной» обратной задачи оптимизации.

**Четвёртый раздел** содержит результаты моделирования процедуры линеаризации усилителя мощности в цифровом предсказывающем устройстве видеоэквивалентов, применительно к узкополосному транзисторному усилителю сигналов с OFDM-модуляцией диапазона 800 МГц с полосой сигнала до 20 МГц и пик-фактором до 7 дБ. Показана возможность достижения энергетического выигрыша по выходной мощности и по коэффициенту полезного действия за счёт использованной процедуры с учётом эффектов памяти.

В **заключении** сформулировано, что автором выполнено научно обоснованное решение задачи повышения эффективности метода цифрового предсказания при выполнении идентификации разомкнутой модели с помощью непрямого обучения и выполнения совместных процедур А.Н. Тихонова, усечения базовой модели Вольтерры с нужным выбором частоты дискретизации.

Список литературы из 108 наименований содержит основные источники исследований и разработок по выбранной теме.

#### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

В рамках диссертационного исследования соискателем получены следующие характеризующиеся новизной результаты:

1) представлена научно обоснованная методика идентификации параметров эквивалентной схемы замещения транзистора с сосредоточенными элементами и с учётом электрической внутренней и тепловой обратной связи, вызванной зависимостью параметров активного элемента от рассеиваемой мощности, которые приводят к возникновению эффектов памяти;

2) дан анализ связи интегральных искажений формы выходных колебаний с мощностью рассеяния в активном элементе, что приводит к эффекту памяти в видеоэквиваленте оператора нелинейных искажений;

3) сделана оценка сверху возможностей цифровых компенсаторов нелинейных искажений в области видеоэквивалентов по схеме с непрямым обучением и регуляризацией по А.Н. Тихонову.

### **Значимость полученных результатов для науки и практики**

Научная значимость исследования состоит в обосновании методики идентификации параметров эквивалентной схемы замещения транзистора с сосредоточенными элементами и с учётом эффектов памяти, вызванных электрической внутренней и тепловой обратной связью из-за зависимости параметров активного элемента от рассеиваемой мощности, а также в определении оценок сверху возможностей цифровой, предсказывающей компенсации нелинейных искажений сигналов.

Практическая значимость работы заключается в выявлении условий возможности снижения уровня внеполосных мешающих излучений радиопередающего устройства на 10 дБ и увеличения полезной выходной мощности в основной полосе частот до 3 дБ при усилении сигналов с OFDM-модуляцией с пик-фактором до 7 дБ. Результаты диссертационной работы внедрены в практическую деятельность АО «НПО Ангстрем».

### **Рекомендации по использованию полученных результатов**

Результаты диссертационной работы могут повысить качественные показатели наземных систем связи и передачи информации. Представленные рассуждения, обоснования и разработанные методы могут быть использованы профильными научно-исследовательскими организациями при проведении научных исследований по созданию высокоэффективных усилителей мощности и ретрансляторов.

### **Достоверность результатов исследований**

Достоверность результатов исследований в диссертационной работе Смирнова А.В. обеспечивается: а) апробацией основных результатов работы на Международных научных конференциях и публикацией в рецензируемых научных изданиях из Перечня списка ВАК и индексируемых в базе Web of Science; б) соотнесением полученных на модели оценок эффективности средств повышения эффективности цифровой предсказывающей линеаризации с рассчитанным аналитически теоретическим пределом; и подтверждается результатами проверки разработанной имитационной модели нелинейных искажений в усилителе мощности на стандартной имитационной модели при различных вариантах тестовых сигналов, оформленным актом внедрения результатов диссертационной работы в эксплуатирующей организации.

Обоснованность научных положений, выводов и заключений диссертации подтверждается результатами модельных исследований. Содержание автореферата в полной мере соответствует материалам, изложенным в диссертации.

### **Апробация и публикация результатов работы**

Результаты исследований, выполненных при подготовке диссертации, представлены в 20 научных статьях, 10 из которых опубликованы в изданиях, включённых в перечень ВАК и/или в международные базы цитирования. Результаты работы также представлены в докладах на 11 всероссийских и международных конференциях.

### **Замечания по диссертационной работе**



1) Основным недостатком работы считаем отсутствие конкретного примера приложения выбранного решения на базе конкретного радиотехнического оборудования; вся экспериментальная часть работы полностью опирается на метод компьютерного моделирования.

2) В качестве усилительного прибора в модели усилителя мощности рассмотрен только биполярный транзистор и не проработан вопрос изменения характера искажений при использовании других типов транзисторов либо ламп бегущей волны.

3) Автору следовало получить свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ, разработанных им при подготовке диссертации.

Представленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, её практической значимости.


### **Заключение и общая оценка работы**

Диссертация Смирнова А.В. «Исследование и компенсация нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 — Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения представляет собой законченную научно-квалификационную работу и содержит значимые научные результаты, внедрение которых позволит значительно повысить качество систем связи и ретрансляции.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Смирнов А.В., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Отзыв рассмотрен и одобрен на совместном заседании отделения создания бортовых комплексов и ВЧ аппаратуры и отделения разработки широкополосной цифро-аналоговой аппаратуры (протокол № 07/1 от 17.11.2022).

Начальник отделения создания бортовых комплексов и ВЧ аппаратуры,  
кандидат технических наук  Александр Евгеньевич Мордвинов

Заместитель начальника отдела создания бортовых радиопередающих устройств  
для космических аппаратов,  
кандидат технических наук, с.н.с.  Владимир Макарович Рожков

Учёный секретарь организации,  
кандидат технических наук, с.н.с.  Сергей Анатольевич Федотов

«17» ноября 2022 г.