

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

**1. Актуальность темы.** Искажения сигналов в усилителях мощности существенным образом определяют основные характеристики современных систем радиосвязи. В научно-технической литературе анализируются различные виды искажений радиочастотных сигналов: линейные, частотные, амплитудные (АМ/АМ), амплитудно-фазовые (АМ/ФМ), дисперсионные, межсимвольные, межканальные, перекрёстные, дисперсионные, интермодуляционные и др. Нелинейные искажения сигнала в рассматриваемой работе – общее наименование явлений, характерных именно для радиочастотных усилителей мощности, функционирующих: а) вблизи насыщения усилительного элемента; б) с повышенной скоростью передачи данных; в) в относительно узкой занимаемой полосе радиочастот; г) при одновременном выполнении компромиссных требований: по уровню радиочастотной мощности, по линейности модуляции в рабочей полосе частот, по энергетической эффективности преобразования на несущую радиочастоту мощности потребления от источника электропитания, по нежелательным внеполосным излучениям, способным создавать непреднамеренные электромагнитные помехи другим радиоэлектронным средствам в условиях дефицита частотного ресурса. Используемые в настоящее время сигнальные конструкции обладают значительным непостоянством амплитуды во времени, что дополнительно усложняет достижение компромисса нескольких указанных выше показателей качества.

В радиопередающих устройствах систем радиосвязи используются твёрдотельные (транзисторные) или вакуумные активные элементы, эквивалентные схемы которых характеризуются различным сочетанием нелинейных, инерционных и частотно-зависимых характеристик. Рассматриваемая диссертация претендует на универсальный подход, но фактически посвящена изучению исключительно явлений в узкополосных транзисторных усилителях мощности сверхвысокочастотного диапазона с цифровыми средствами линеаризации для вычислительной обработки видеоэквивалентов узкополосных радиосигналов. Ранее исследованные и разработанные методы линеаризации усилителей радиочастотной мощности оказываются в указанных условиях недостаточно эффективными.

Поэтому актуальность поставленной в диссертации основной задачи выработки научно обоснованного подхода для цифровой компенсации нелинейных искажений радиосигналов сомнений не вызывает.

**2. Научная новизна.** В работе впервые: а) представлена научно обоснованная методика идентификации параметров эквивалентной схемы замещения транзистора с сосредоточенными элементами при учёте электрической внутренней и тепловой обратной связи, вызванной зависимостью параметров активного элемента от рассеиваемой мощности, которые приводят к возникновению эффектов памяти; б) выполнен анализ связи интегральных искажений формы выходных колебаний с мощностью рассеяния в активном элементе, что приводит к эффекту памяти в видеоэквиваленте оператора нелинейных искажений; в) дана оценка сверху предельных возможностей цифровых компенсаторов нелинейных искажений.

Вход. № 118/22  
«16» 11 20 г. д.д.  
подпись



**3. Практическая ценность** полученных результатов состоит в выявлении возможности дополнительного снижения до 10 дБ уровня внеполосных мешающих излучений радиопередающего устройства и увеличения полезной выходной мощности до 3 дБ за счёт использования алгоритмического цифрового предсказания в видеоканале с непрямым обучением на тестовой задаче для сложного сигнала с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением каналов (OFDM-модуляция), который характеризуется пик-фактором до 7 дБ.

**4. Обоснованность и достоверность** полученных результатов сомнений не вызывают.

**5. Апробация, публикации и личный вклад.** Выполненная соискателем апробация полученных результатов на российских и международных научных конференциях и семинарах соответствует требованиям ВАК: им лично сделано 10 выступлений по теме исследований на научно-технических форумах. Основные результаты работы в достаточной мере опубликованы: 5 публикаций в русскоязычных периодических изданиях из Перечня ВАК, 4 – в трудах международных научных конференций, индексируемых в Scopus и WoS, 7 – в изданиях, индексируемых в РИНЦ; 12 публикаций выполнены без соавторов. Самостоятельность автора несомненна.

**6. Структура представленной работы.** Основной текст содержит 117 страниц основного текста, включая 64 рисунка и 11 таблиц. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы из 108 наименований и дополнена четырьмя приложениями.

**Введение.** В этом разделе: а) обоснована актуальность темы исследования; б) представлена постановка задачи об искажениях радиосигналов в усилителях мощности; в) сформулированы цель и основная задача исследования; г) представлен перечень из пяти решаемых для достижения указанной цели задач; д) приведён обзор научной литературы по теме; е) сформулированы элементы научной новизны и положения, выносимые на защиту.

**Первый раздел** посвящён изложению основных сведений о выборе сигнальных конструкций в современных системах радиосвязи. В нём развёрнуто понятие о взаимной зависимости линейности усиления и коэффициента полезного действия устройства. «Линейность усиления» здесь используется в качестве качественной характеристики узла без количественной оценки её уровня, а коэффициентом полезного действия называется энергетическая эффективность преобразования мощности источника постоянного тока электропитания в высокочастотную мощность модулированного сигнала в рабочей полосе частот. Основное внимание уделено построению сложных сигналов с OFDM-модуляцией, а также ансамблей сигналов с прямым расширением спектра и кодовым разделением каналов. Диссертантом сделан вывод о целесообразности использования для описания таких сигналов вероятностной модели в виде комплексного узкополосного гауссовского случайного процесса с прямоугольной огибающей спектральной плотности мощности и с распределением амплитуд по закону Релея. Подчёркнута значительная неравномерность во времени амплитудной огибающей перспективных сложных сигналов с неполной ортогональностью и с высоким значением пик-фактора.

В качестве простейшего метода снижения пик-фактора рассмотрено жёсткое двустороннее ограничение амплитудной огибающей с последующим частотным ограничением при помощи сглаживающего фильтра Найквиста. Энергетическая эффективность усиления мощности радиосигнала характеризуется (с учётом вероятностных характеристик амплитудной огибающей) уровнем полезной мощности первой гармоники выходного сигнала и усредненным за длительность передачи сообщения значением



коэффициента полезного действия. Описаны типовые схемы повышения эффективности усиления мощности (метод Кана, метод автоматической регулировки режима – АРР, метод Догерти, метод дефазирования). Сделан вывод о целесообразности использования предсказывающего цифрового компенсатора нелинейных искажений по сравнению с известными из литературы вариантами отрицательной обратной связи или связи вперёд.

**Во втором разделе** выполнен анализ оператора нелинейных искажений на базе схемы замещения видеозквивалента оператора нелинейных искажений в транзисторном усилителе мощности в виде сосредоточенных LCR-элементов и управляемых источников тока. Выполнена классификация нелинейных искажений, вызванных эффектом памяти в амплитудно-амплитудных и амплитудно-фазовых преобразованиях. Для оценки уровня эффекта памяти в работе применяется тестовый двухчастотный сигнал с заданным разносом частот по сравнению с шириной рабочей полосы. Показано, что в области видеозквивалентов такой входной сигнал создаёт мультипликативную помеху в виде косинуса полуразности частот входного теста.

В качестве источников эффекта памяти рассмотрены цепи электрической внутренней и тепловой обратной связи в усилительном элементе. Введён индикатор уровня нелинейных искажений и проявления эффекта памяти в виде коэффициента чувствительности мощности искажений к разному двух частот тестового сигнала. По определению диссертанта, этот индикатор учитывает интермодуляционные компоненты только нечётного (3-го, 5-го и т. д.) порядка. Между тем, в литературе (например, в монографии Ф. Сечи и М. Буджатти «Мощные твёрдотельные СВЧ-усилители». – Изд-во Техносфера, 2016. – 416 с.) имеются указания на то, что компоненты интермодуляционных искажений чётного порядка, попадающие в базовую полосу видеочастот, формируют в цепи смещения токи с частотой изменения амплитудной огибающей, что приводит к низкочастотной модуляции смещения рабочей точки усилительного элемента и к не учтённому в диссертации механизму эффекта памяти из-за ограниченной полосы пропускания цепей блокировки.

**В третьем разделе** анализируются погрешности идентификации оператора цифрового предсказания при помощи процедуры обучения на наиболее близкой к реальному сигналу тестовой задаче. Предложено выполнять регуляризацию по методу А. Н. Тихонова так называемой «некорректной» задачи для снижения погрешностей идентификации, вызванных усечением обобщённых рядов Вольтерры по времени или по степени нелинейности.

**В четвёртом разделе** приведены результаты имитационного моделирования нелинейных искажений сигналов в усилителе мощности с предложенным компенсатором в вычислительной среде SPICE на примере транзисторного усилителя мощности со средней частотой 800 МГц и полосой усиливаемого сигнала до 20 МГц для сценариев функционирования транзисторного усилительного элемента в классах АВ и F при сигналах с OFDM-модуляцией и пик-фактором до 7 дБ с дополнительным повышением частоты дискретизации до 16 раз. Диссертантом введён параметр «Общесистемный выигрыш по выходной мощности и по коэффициенту полезного действия». На модели показано влияние нелинейности эффекта памяти при вариации температуры с учётом механизмов внутренней электронной и тепловой обратной связи.

**В заключении** сформулировано, что основным результатом диссертации является научно обоснованное решение задачи повышения эффективности метода цифрового предсказания при выполнении идентификации разомкнутой модели с помощью непрямого обучения при совместном проведении процедур регуляризации по А. Н. Тихонову, усечения



базовой модели Вольтерры и подбора частоты дискретизации. Соискателем предложены направления дальнейших исследований за пределами решённой научной задачи.

В *списке литературы* упомянуты основные источники публикаций по теме. Однако, в нём отсутствует ссылка на вышедший в свет недавно фундаментальный учебник для вузов «Радиопередающие устройства» под общей редакцией Р. Ю. Иванюшкина (изд-во Горячая линия - Телеком, 2019. –1200 с.), в котором есть ряд пересечений с диссертацией по созданию усилителей мощности с высокими одновременно предъявляемыми требованиями по энергетике и по линейности модуляции. Диссертанту следовало бы в обзоре литературы показать место данного исследования по сравнению с другими опубликованными русскоязычными материалами в плане решаемой научной проблемы: монография Н. А. Рубичева «Оценка и измерение искажений радиосигналов» (Москва, изд-во Советское радио, 1978, –168 с.), где был представлен единый подход к характеристикам произвольных искажений радиосигналов; серия статей и диссертация Ле Ван Ки «Алгоритмические методы компенсации нелинейности усилителя мощности» (журнал «Цифровая обработка сигналов»: 2016, № 1; 2017, № 4; 2018, № 1), в которых применительно к системам с OFDM-модуляцией рассмотрены близкие к рассмотренным процедуры снижения пик-фактора и линеаризации усилителей мощности. Не приведены ссылки на русскоязычные публикации последних лет по минимизации искажений радиосигналов в усилителях мощности: монография В. П. Кудряшова [и др.] «Искажения и коррекция сигналов в усилителях на лампах бегущей волны» (изд-во Радиотехника, 2018. – 280 с.); учебное пособие для вузов Белова Л. А. «Интермодуляционные искажения сигналов сверхвысоких частот» (изд-во Горячая линия - Телеком, 2020. –144 с.) и др. Тексты диссертационной работы А. В. Смирнова оригинальны и не противоречат упомянутым выше источникам.

#### **6. Замечания по тексту диссертации:**

1) В качестве эквивалентной схемы активного элемента рассмотрены модели исключительно узкополосных транзисторных усилителей мощности с сосредоточенными параметрами без учёта особенностей электровакуумных усилительных приборов, например, лампы бегущей волны, что не соответствует утверждению на стр. 99 об «универсальности предложенного подхода к произвольным усилителям».

2) В расчётных примерах используется прямоугольная модель огибающей спектральной плотности мощности входного сигнала усилителя, что не вполне соответствует опубликованным в литературе результатам натуральных измерений.

3) Рассмотрение варианта линеаризации усилителя мощности при помощи отрицательной обратной связи (стр. 26, рис. 1.12, стр. 29) выглядит недостаточно убедительным без учёта задержек в цепях преобразования радиочастотного сигнала в видеэквиваленты сигналов в цифровом предискажающем устройстве с последующим модуляционным преобразованием, которые могут приводить к комплексности обратной связи и к нарушению устойчивости системы.

4) Не учтён механизм появления продуктов интермодуляционных искажений чётного порядка в базовой полосе частот вблизи постоянного тока, которые приводят к модуляции рабочей точки смещения транзистора с частотой пульсации амплитуды входного сигнала, а из-за ограниченной ширины полосы пропускания блокировочных цепей могут стать дополнительным источником возникновения эффекта памяти.

5) Проверка достоверности исследования выполняется при помощи имитационного моделирования без сопоставления с результатами прямых натуральных измерений. «Экспериментальная» оценка эффективности цифрового предискажения



выполняется на вычислительной модели непрямого обучения по методу наименьших квадратов (НО/НК) без рассмотрения практически реализуемой сложности вычислительных операций и продолжительности их выполнения для успешной процедуры обучения.

6) В целом хорошо структурированный текст диссертации загроможден американизмами («верифицирование», «валидирование», «резюмирование», «доминирование», «симуляция», «имплементация», «сэмплирование», «оффлайн-идентификация», «клиппирование», «двухтоновое» и «однотоновое» возбуждение). Для них следовало бы использовать подходящие русскоязычные формулировки или поместить рекомендуемый национальным стандартом словарь терминов.

Высказанные замечания не снижают высокого уровня научной и практической значимости диссертационной работы.

**Автореферат** достаточно полно отражает основные результаты диссертационного исследования.

7. **Заключение.** Оценивая представленную работу в целом, можно констатировать, что она соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно; она содержит результаты теоретических и модельных исследований, соответствующих критерию новизны; в ней изложены научно обоснованные решения, подтверждённое внедрение которых в деятельность промышленного предприятия характеризует значительный вклад в решение важной народнохозяйственной проблемы создания беспроводных средств передачи цифровой информации с высокими параметрами по точности, по достоверности и по выполнению требований к электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Содержание диссертации соответствует указанной научной специальности, а её автор Смирнов Андрей Владимирович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Национального исследовательского университета «МЭИ», кандидат технических наук, профессор

Краткие сведения об оппоненте:

контактный. телефон +7 (910) 462-71-34. – Адрес эл. почты [belovla@gmail.com](mailto:belovla@gmail.com).

– Дом. адрес: 123423, г. Москва, ул. Народного ополчения, д. 28, кор. 1, кв. 170.

«11» ноября 2022 г.

  
/Белов Л. А./

Подпись профессора Белова Леонида Алексеевича заверяю



ПОДПИСЬ НАЧАЛЬНИКА  
ОТДЕЛА РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ  
Л.И. ПОЛЕВАЯ