

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 55.2.002.01
НА БАЗЕ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.12.2022, протокол № 102 о присуждении Смирнову Андрею Владимировичу ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация Исследование и компенсация нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности по специальности **2.2.13** – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения принята к защите 03 октября 2022г., протокол №98 диссертационным советом 55.2.002.01 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (далее МТУСИ), Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а, Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 244/нк от 03 марта 2016 г., изменения в составе утверждены Приказами Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 37/нк от 30.01.2019, № 599/нк от 15.10.2020, №804/нк от 16.12.2020 г., № 331/нк от 12.04.2021г.

Соискатель Смирнов Андрей Владимирович «03» февраля 1991 года рождения, в 2016 году окончил аспирантуру МТУСИ. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2022 г. Работает ведущим инженером-исследователем в АО НПО Ангстрем.

Диссертация выполнена на кафедре «Радиооборудование и схемотехника» МТУСИ.

Научный руководитель доктор технических наук, Горгадзе Светлана Феликсовна, проф. кафедры «Радиооборудование и схемотехника».

Официальные оппоненты:

Хвалин Александр Львович, доктор технических наук, доцент, проф. кафедры общей, теоретической и компьютерной физики Саратовского национального исследовательского государственного университета, **Белов Леонид Алексеевич**, кандидат технических наук, профессор, проф. кафедры формирования и обработки радиосигналов института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Национального исследовательского университета «МЭИ» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация АО Российские космические системы в лице зам. генерального директора по науке, д.т.н., проф. Круглова Александра Викторовича в положительном отзыве на диссертацию указала, что работа вполне соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Соискатель имеет 22 печатные работы, 21 из которых по теме диссертации.

Публикации в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК:

1. Смирнов, А. В. Принципы повышения эффективности усиления сигнала с большим пик-фактором / А. В. Смирнов, С. Ф. Горгадзе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2013. — Т. 7, № 9. — С. 132—134. <объем 3 с., личный вклад 2,5 с.>
2. Смирнов, А. В. Исследование эффекта АМ-РМ искажений при высокоэффективном усилении мощности / А. В. Смирнов // Электросвязь. — 2016. — № 4. — С. 61—64.
3. Смирнов, А. В. Потенциальный КПД усилителей сложных композитных сигналов / А. В. Смирнов, С. Ф. Горгадзе // Электросвязь. — 2016. — № 2. — С. 68—74. <объем 7 с., личный вклад 6 с.>
4. Смирнов, А. В. Модель безынерционного нелинейного устройства в виде разложения по ортогональным функциям / А. В. Смирнов // Радиотехника. — 2017. — № 3. — С. 32—39.

5. Smirnov, A. V. The novel applications of nonlinear power amplifier model / A. V. Smirnov // T-Comm. — 2015. — Vol. 9, no. 9. — P. 76—84.

Публикации, индексируемые в базах Scopus/WoS:

1. Smirnov, A. V. Use of regularization in indirect learning identification of predistorter / A. V. Smirnov // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Svetlogorsk, Kaliningrad region, Russia: IEEE, 07/2020.
2. Smirnov, A. V. Optimization of digital predistortion with memory / A. V. Smirnov // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). — Minsk, Belarus : IEEE, 07/2018.
3. Smirnov, A. V. Cascaded Model of Nonlinear Operator for Digital Predistortion with Memory / A. V. Smirnov // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). — Jaroslavl, Russia: IEEE, 07/2019. — P. 1—5.
4. Smirnov, A. V. Application of Wiener polynomial decomposition to power amplifier linearization problem / A. V. Smirnov // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). — Kazan, Russia : IEEE, 07/2017.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили 6 отзывов: ООО "Нирит-Синвэй Телеком Технолоджи", Рязанский государственный радиотехнический университет, АО "НПК "НИИДАР", ООО "Техкомпания Хуавей", ООО "Радиокомп", Московский авиационный институт.

Были отмечены следующие недостатки.

1. Использование в качестве критерия нелинейных искажений двухтонового метода, в то время как в настоящее время с этой целью используются две метрики: нормализованная среднеквадратическая ошибка (NMSE) и коэффициент моделирования эффектов памяти (MEMR), которые даже не упоминаются в автореферате.

2. Из автореферата не ясно, каким образом может быть синтезирована описанная автором в 4-ом разделе модель усилителя: автору следовало добавить программный код модели в приложение.
3. На рисунке 9 автореферата автор сопоставляет КПД и выходную мощность усилителя для вариантов «без компенсации искажений» и «с компенсацией согласно предложенному методу»; при этом отсутствует результат, который бы отражал эффективность какого-либо общепризнанного метода компенсации, например, метода обратной связи.
4. Не рассмотрен способ компенсации нелинейных искажений «связь вперед».
5. Из автореферата не ясно, был ли автором предложен какой-либо более эффективный способ выбора параметров метода обобщённой регуляризации, чем способ прямого перебора.
6. В первой половине диссертации автор ссылается на актуальность решаемой задачи для систем 5G; в то же время построенная им в разделе 4 симуляционная модель рассчитана на применение к сигналу с полосой 20 МГц при частоте несущей 800 МГц, что не соответствует параметрам систем 5G.
7. При указании практической значимости в пункте 3 не понятно относительно какой скорости дискретизации получено снижение в 5 раз.
8. Некоторые важные параметры не определены в тексте перед использованием (например N на рис. 2), либо определены косвенно (например, P на стр. 13, последний абзац).
9. Из приведённой в автореферате информации не до конца понятно, как оценить вычислительные затраты (например, в количестве операций умножения) алгоритма предсказания пользуясь параметрами P и N .
10. В работе не рассмотрено влияние эффектов конечной разрядности вычислений на качество предсказания.
11. Недостаточно ссылок на отечественные работы. На наш взгляд, автору следовало обратить внимание на работу «Функциональные модели

усилителя мощности с Эффектом памяти» (Информатика, телекоммуникации и управление. 2012. №5, Коротков А.С., Румянцев И.А.).

12. В 4-ом разделе при построении эксперимента не заданы требования к характеристикам усилителя мощности для эффективной реализации компенсации нелинейных искажений сигнала.

13. Отсутствует сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования компенсации нелинейных искажений сигнала в усилителях мощности.

14. В модель усилителя инкорпорирована эквивалентная схема биполярного транзистора, но транзисторы подобного типа в настоящее время довольно редко используются в усилителях OFDM-сигналов СВЧ-диапазона.

Недостатки, отмеченные оппонентами и ведущей организацией, следующие.

1. Отсутствуют ссылки на известные технические устройства, либо прикладные программы, которые можно использовать в качестве прототипов для последующей оценки эффективности предложенных автором решений.

2. В списке публикаций автора отсутствуют патенты и зарегистрированные в Реестре Роспатента программы для ЭВМ, хотя представленные в диссертации результаты по своему техническому и научному уровню вполне удовлетворяют соответствующим критериям.

3. Нет предложений по практическому применению предложенных решений. В акте внедрения не указаны конкретные технические устройства, в которых результаты использованы.

4. В тексте диссертации и автореферата автором использовано неоправданно большое число сокращений, которые затрудняют восприятие материала.

5. В качестве эквивалентной схемы активного элемента рассмотрены модели исключительно узкополосных транзисторных усилителей мощности с сосредоточенными параметрами.

6. В расчётных примерах используется прямоугольная модель огибающей спектральной плотности мощности входного сигнала усилителя.

7. Рассмотрение варианта линеаризации при помощи отрицательной обратной связи выглядит недостаточно убедительным без учёта задержек в цепях преобразования радиочастотного сигнала в видеозэквиваленты сигналов.

8. Не учтён механизм появления продуктов интермодуляционных искажений чётного порядка в базовой полосе частот вблизи постоянного тока.

9. Проверка достоверности исследования выполняется при помощи имитационного моделирования без сопоставления с результатами прямых натурных испытаний.

10. В целом хорошо структурированный текст диссертации загрязнён американизмами.

11. Отсутствует конкретный пример приложения выбранного решения на базе конкретного радиотехнического оборудования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их высоким уровнем экспертизы применительно к предмету исследования работы и активным участием в научной разработке затрагиваемых в ней проблем, что подтверждается числом их публикаций по теме диссертации за последние 5 лет.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований выработан подход к повышению эффективности метода предискажения, позволяющий снизить уровень внеполосного излучения на выходе усилителя мощности;

предложено использование метода регуляризации, известного в первую очередь по приложениям к линейным некорректным задачам, к задаче идентификации нелинейного оператора предискажения;

научно обоснована возможность уменьшения внеполосного излучения при использовании предложенного подхода.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что автором предложено и обосновано рассмотрение метода регуляризации А. Н. Тихонова как средства для косвенной подстройки параметров модели

предкорректора; предложено обобщение метода, учитывающее специфику технической задачи.

Применительно к проблематике диссертации использован математический аппарат теории решения некорректных задач, а также метод переменных состояния для построения математической модели усилителя мощности в виде системы дифференциальных уравнений;

раскрыты противоречия и изучены взаимосвязи между частотой дискретизации тестовых сигналов при идентификации параметров модели предсказания и числа параметров модели, требующегося для достоверного описания идеального предкорректора при характере нелинейных искажений, заданном оператором Винера-Хаммерштейна

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждено тем, что:

имеется акт о внедрении в АО «НПО Ангстрем», согласно которому разработанная в работе модель усилителя позволила уточнить имитационную модель канала формирования и распространения сигнала, учтя в ней нелинейные эффекты памяти усилителя; алгоритм повышения точности идентификации предкорректора в сочетании с общей моделью линеаризации методом цифрового предсказания лёг в основу базовой математической модели для исследования алгоритмов линеаризации усилителей мощности;

разработана и реализована на языке программирования python модель РЧ УМ в виде системы дифференциальных уравнений, позволяющая расширить функционал стандартного пакета схемотехнического моделирования MicroCAP в части моделирования искажений сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией,

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- **апробацией** основных результатов работы на Международных научных конференциях и публикацией в рецензируемых научных изданиях;
- **использованием стандартных моделей** операторов нелинейных искажений (модели Горбани и Винера-Хаммерштейна) и операторов предсказания (модели Вольтерры, Филикори-Мирри и др.);

- **соотнесением** полученных оценок эффективности средств повышения эффективности ЦПИ с теоретическим пределом, рассчитанным аналитически для задачи линеаризации оператора Винера–Хаммерштейна;
- **установлением воспроизводимости** разработанной имитационной моделью НИ в УМ отклика стандартного схемотехнического симулятора MicroCAP (SPICE) на заданное тестовое воздействие;
- **использованием широко известного принципа** регуляризации А. Н. Тихонова как основной идеи предложенного в работе подхода;
- **использованием современных средств** компьютерного моделирования и численных расчётов, связанных с задачами интегрирования систем дифференциальных уравнений и обращения плохо-обусловленных матриц.

Личный вклад соискателя состоит в проведении теоретического исследования, разработке программного кода для проведения компьютерного моделирования, подготовке научных публикаций, отражающих результаты работы. Все приведённые в диссертации результаты получены автором лично.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие **критические замечания**: в работе не указано об аппаратной реализации разработанных алгоритмов и не оценена их вычислительная сложность, не оценена их эффективность в условиях, когда частота оцифровки ЦАП сопоставима с шириной полосы сигнала на входе предкорректора.

Соискатель Смирнов А.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

Диссертация Смирнова А.В. является научно-квалификационной работой, содержащей научно обоснованное решение задачи компенсации эффекта нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности, имеющей значение для развития отрасли знаний, соответствующей специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям п.9 и п.10 Положения о

присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842, а ее автор Смирнов Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

На заседании 15 декабря 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Смирнову А.В. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного
совета 55.2.002.01



А.С. Аджемов

Ученый секретарь диссертационного
совета 55.2.002.01

М.В. Терешонок

15 декабря 2022 г.