

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

Смирнова Андрея Владимировича «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).

Актуальность темы диссертации.

Учёт нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности необходим при проектировании современных систем радиосвязи. Это обусловлено жёсткими требованиями к внеполосному излучению на выходе передатчика, которое определяется характером нелинейных искажений в усилителе мощности. Выполнение требований, ограничивающих внеполосные искажения, зачастую осложняется стремлением оптимизировать другие целевые показатели систем радиосвязи: энергетическую эффективность работы радиооборудования и скорость передачи информации по радиоканалу. Задача одновременной оптимизации трёх указанных показателей представляет значительную техническую сложность, поскольку улучшение одного показателя приводит к ухудшению остальных. Этими обстоятельствами объясняется необходимость моделирования и компенсации нелинейных искажений в усилителе мощности.

В теоретических разделах диссертации Смирнова А.В. проанализированы вопросы линейности и КПД усиления сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией, проведен анализ оператора нелинейных искажений, способов идентификации оператора цифрового предискажения и факторов, влияющих на потери точности его идентификации. На основе проведенных исследований автором предложен оптимальный набор базисных составляющих линейно-параметрической модели (ЛПМ).

Основными характеристиками ЛПМ являются: параметры дискретизации, ошибка идентификации (функционал потерь), параметр регуляризации А. Н. Тихонова. Оптимальной стратегией решения некорректных задач идентификации является выполнение дискретизации одновременно с минимизацией функционала потерь. Для реализации данной стратегии использовано свойство оператора Вольтерры в дискретном времени воспроизводить действие широкого класса нелинейных операторов.

При значительных интенсивности и инерционности нелинейных искажений максимально достоверная модель цифрового предискажения (ЦПИ) в виде оператора Вольтерры оказывается практически нереализуемой ввиду своей избыточной сложности. Необходимость значительного упрощения модели Вольтерры для практической применимости ЦПИ подчёркивалась ещё в первых работах по компенсации нелинейных искажений в начале 2000 годов. Таким образом, практически достижимая эффективность ЦПИ во многом определяется соотношением между потенциальной достоверностью оператора ЦПИ и совокупной сложностью линеаризатора с учётом процедуры идентификации и частоты дискретизации.

В связи с изложенным выше, проблема уравнивания сложности и достоверности ЦПИ в настоящее время остаётся актуальной. Также актуальными являются задачи анализа и идентификации оператора ЦПИ, выбора компонентов модели и частоты дискретизации.

115/02-1
11/02

Автором проведена идентификация оператора ЦПИ по критерию минимизации среднеквадратичной ошибки постобращения с использованием непрямого обучения. Созданы линейно-параметрические модели оператора ЦПИ, позволяющие использовать для идентификации математический аппарат линейной оптимизации с целевой функцией потерь линеаризатора, позволяющей компенсировать внеполосные искажения сигнала в усилителе мощности.

Предложенная автором процедура может рассматриваться как обобщённая регуляризация по А.Н.Тихонову задачи идентификации ЦПИ по модели Вольтерры.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Основные положения и результаты, выводы и рекомендации диссертации, касающиеся выбора компонентов модели и частоты дискретизации, принципов идентификации оператора ЦПИ, метода обобщённой регуляризации основаны: на теории разложений с использованием ряда Вольтерры, разложений оператора Винера-Хаммерштейна, средствах повышения точности идентификации на основе процедуры регуляризации А. Н. Тихонова.

Научные положения и выводы диссертации согласуются с современными научными представлениями и данными отечественных и зарубежных информационных источников, а также подтверждаются их обсуждением в 4 научных изданиях, индексируемых в Scopus и WoS, 5 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, материалах 6 международных конференций.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Научная новизна работы заключается в научно-обоснованном применении к задаче идентификации нелинейного оператора ЦПИ метода регуляризации и его обобщение путём включения в набор параметров регуляризации частоты дискретизации и степени усечения базовой модели Вольтерры; выводе линейно-параметрической модели ЦПИ для оператора Винера-Хаммерштейна, обладающей минимально допустимой сложностью; выявление зависимости нелинейных искажений сигнала от формы выходных колебаний транзистора и рассеиваемой на нём тепловой мощности, не учитываемых упрощённой моделью ЦПИ Винера-Хаммерштейна.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается строгостью используемых математических моделей, корректностью упрощающих допущений и соответствием полученных аналитически результатов линеаризации оператора Винера-Хаммерштейна и имитационной модели нелинейных искажений в усилителе мощности по критерию воспроизводимости отклика стандартного схемотехнического симулятора SPICE при заданном тестовом воздействии и различных конфигурациях модели.

Ценность данной работы для науки и практики

Практическая ценность диссертации состоит в том, что предложенный подход к повышению эффективности метода линеаризации ЦПИ позволил:

1. снизить уровень спектральной плотности мощности сигнала в соседнем канале на выходе нелинейности Винера-Хаммерштейна на 5-10 дБ относительно стандартной идентификации линейно-параметрической модели ЦПИ;
2. увеличить полезную выходную мощность усилителя мощности более чем на 3 дБ при выполнении требований к внеполосному искажению при усилении сигнала OFDM с полосой 20 МГц по сравнению с базовым методом линеаризации на основе подбора ослабления входного сигнала усилителя мощности;

3. минимизировать потери линеаризации при 5-кратном снижении частоты дискретизации тестовых сигналов, используемых при идентификации ЦПИ, до 1.2 дБ в терминах осреднённого уровня избыточного внеполосного излучения.

Теоретическая ценность работы обоснована следующими результатами:

1. Разработана имитационная модель усилителя мощности на основе численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, учитывающая эквивалентную схему замещения транзистора. Учёт в модели эффектов тепловой и электрической ОС, типичных для произвольного усилителя мощности, позволил повысить достоверность моделирования нелинейных искажений в усилителе мощности по сравнению со стандартной моделью оператора Винера-Хаммерштейна.

2. Выявлены факторы, ограничивающие точность идентификации оператора ЦПИ при использовании архитектуры непрямого обучения и критерия среднеквадратичной ошибки оператора нелинейных искажений в усилителе мощности.

3. Разработан универсальный подход к повышению эффективности ЦПИ, позволяющий рассматривать общую задачу выбора оптимального оператора ЦПИ как обобщённую регуляризацию задачи идентификации оператора Вольтерры с параметрами: степень усечения базовой модели Вольтерры, частота дискретизации, а также параметр регуляризации А. Н. Тихонова.

Критические замечания:

1. В диссертационной работе 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. В диссертационной работе 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.

Заключение

Изложенные недостатки не снижают научного и практического значения диссертации Смирнова А.В. и не влияют на её общую положительную оценку. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача повышения эффективности метода ЦПИ для компенсации нелинейных искажений сигнала в усилителях мощности при использовании архитектуры непрямого обучения линейно-параметрической модели оператора ЦПИ.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, раскрывает основные положения работы и полученные результаты. В заключении автореферата приведены основные выводы по диссертации. Диссертация Смирнова А.В. «Исследование и компенсация нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности» соответствует паспорту специальности 2.2.13 (Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения) в п. 1, 5 и 6. Основные выводы по результатам исследований достоверны и обоснованы. Положения, выносимые на защиту, достаточно полно опубликованы в рецензируемых изданиях и апробированы на научных конференциях.

Диссертация и автореферат Смирнова Андрея Владимировича отвечают требованиям ВАК Минобрнауки РФ, соответствуют требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положе-

ния о присуждении ученых степеней», Смирнов А.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 (Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

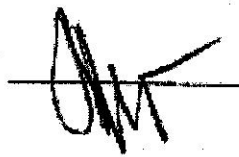
Официальный оппонент, д.т.н., профессор кафедры общей, теоретической и компьютерной физики института физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» Хвалин А.Л.
09 ноября 2022 г.

Сведения об оппоненте:

д.т.н., профессор кафедры общей, теоретической и компьютерной физики института физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

410012 Саратов, ул. Астраханская, д. 83. Телефон: (964)848-37-20, E-mail: Khvalin63@mail.ru

Официальный оппонент



Хвалин Александр Львович

