

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации 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»

Благодаря развитию новых транзисторных технологий и использованию новых классов усиления в настоящее время стало возможным создание даже в СВЧ-диапазоне мощных усилителей с КПД порядка 80%. Однако получение столь высокой энергетической эффективности в современных системах беспроводной связи весьма проблематично из-за значительной неравномерности амплитудной огибающей усиливаемых сигналов, что требует создания высоко линейных усилителей мощности, у которых обеспечиваются требования к уровню внеполосных излучений, установленных соответствующими стандартами и регламентами. Это требует использования методов линеаризации характеристик передатчика, который должен быть линейным во всем диапазоне излучаемой динамической мощности, что позволяет работать с меньшей выходной мощностью, по сравнению со случаем, когда линеаризация не применяется.

Основной технологией линеаризации характеристик усилителей мощности в настоящее время является метод цифровых предварительных искажений усиливаемого сигнала в сочетании с разработкой его поведенческих моделей, включающих рассмотрение динамических нелинейных эффектов памяти. Необходимость создания столь сложных моделей при решении проблемы компенсации искажений усиливаемого сигнала зависит, как правило, от вида амплитудной огибающей и ширины спектра последнего, а также от характеристик рассеиваемой мощности и работы системы охлаждения прибора, то есть от тепловых эффектов применяемого активного элемента (транзистора). По-видимому, если ширина спектра сигнала не превышает 10 МГц, а флуктуации температуры в области переходов транзистора - нескольких градусов, то методами схемотехнического проектирования усилителя мощности можно добиться пренебрежимо малого влияния динамических эффектов памяти на искажения усиливаемого сигнала. В этом случае нелинейные эффекты объясняются естественными условиями (режимами) функционирования высокоэффективного усилителя мощности, который в этом случае можно рассматривать как нелинейный статический прибор, который описывается с помощью модели Салеха, ряда Тейлора и т.д. Таким образом, в современных системах связи, в которых ширина полосы усиливаемого сигнала составляет несколько десятков МГц и более, практически всегда возникают нелинейные эффекты памяти в передающей аппаратуре, компенсация которых позволяет повысить информационную эффективность канала связи. Таким образом, тема диссертации А.В.Смирнова, задачи, решаемые в ней, а также общие подходы и развиваемые методы их решения являются весьма актуальными и соответствуют современному уровню развития теории и практики радиотехнических устройств и систем.

Судя по автореферату, основными результатами работы являются:

- разработанный универсальный подход к повышению эффективности цифрового предварительного искажения усиливаемого сигнала, предполагающий рассмотрение общей задачи выбора оптимального оператора предварительного искажения в процессе регуляризации задачи идентификации оператора Вольтерры, параметрами которой являются степень

Вход. № 144/22  
«06» 12 2022  
подпись

усечения этого оператора, частота дискретизации тестовых сигналов на входе идентификатора, а также параметр регуляризации А. Н. Тихонова;

- выявленные факторы, ограничивающие точность идентификации оператора предварительных цифровых искажений в случае использования архитектуры непрямого обучения и критерия среднеквадратического отклонения пост-обращения оператора нелинейных искажений в усилителе мощности, что позволило повысить эффективность линейризации характеристики усилителя мощности;

- разработанный метод обобщенной регуляризации для повышения эффективности цифровых предварительных искажений в рамках архитектуры непрямого обучения, что позволило обосновать получение выигрыша более чем в 5 дБ по уровню спектральной плотности мощности в соседнем канале, по сравнению со стандартным подходом идентификации максимально достоверной модели цифровых предварительных искажений.

Предложенные теоретические подходы к решению задачи линейризации усилителя мощности проиллюстрированы на примере разработанной его модели в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений при усилении группового OFDM-сигнала. При этом в модель усилителя инкорпорирована эквивалентная схемы биполярного транзистора, но транзисторы подобного типа в настоящее время довольно редко используются в усилителях OFDM-сигналов СВЧ-диапазона.

Несмотря на отмеченный недостаток диссертация А.В.Смирнова представляет собой высококвалифицированное, самостоятельное, завершенное исследование, в котором решена актуальная задача, имеющая важное научно-прикладное значение. Диссертация «Исследование и компенсация нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности» удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Андрей Владимирович Смирнов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование» института №8 «Компьютерные науки и прикладная математика» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ, (125993, г.Москва, Волоколамское ш., д.4, тел.: +7(903)715-71-27, [Chernova3244@gmail.com](mailto:Chernova3244@gmail.com), <https://mai.ru/education/>), д.т.н. (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент

*Чер*

Чернова Татьяна Александровна

Подпись Черновой Т.А.

Удостоверяю «23»

2022г.

Заместитель начальника

Управления по работе с персоналом МАИ



(Иванов М.А.)