

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук старшего научного сотрудника Разинькова Сергея Николаевича на диссертацию Бугрова Олега Владимировича на тему: «Цифровая линейаризация многоканальных систем связи» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика

*Актуальность темы диссертации.* Увеличение интенсивности информационного обмена по каналам радиосвязи при ограничениях на пространственно-частотный ресурс и повышение требований к устойчивости и надежности функционирования приемно-передающих устройств определяют важность исследований, направленных на обеспечение их электромагнитной совместимости и улучшение энергетических показателей радиоканалов.

Стационарные центры и мобильные комплексы радиосвязи содержат в своем составе большое количество компактно размещенных радиоэлектронных средств с общими или перекрывающимися по значениям секторами углов и диапазонами рабочих частот. Для обеспечения благоприятных условий функционирования таких объектов, наряду с определением рациональных вариантов компоновки аппаратуры на основе компромиссных технических решений, требуется проводить поиск конструктивных схем исполнения в соответствии с тактико-техническими характеристиками, обеспечивающими заданные показатели эффективности передачи-приема сигналов.

Возможности повышения спектральной и энергетической эффективности многоканальных систем радиосвязи в значительной степени обуславливаются эксплуатационными свойствами усилителей мощности передающих трактов радиосистем. При этом достижение высокого энергетического потенциала радиоканала в интересах увеличения дистанции связи сопровождается переводом усилителей в нелинейный режим работы, где могут возникать нелинейные искажения, расширяющие спектры выходных сигналов и ухудшающие электромагнитную совместимость приемно-передающих устройств. Радиоизлучения собственных и сторонних источников оказывают деструктивные воздействия на электронные компоненты радиопередающих и радиоприемных трактов, нарушение или смена режимов функционирования которых способны породить сбои и отказы в работе изделий.

В условиях интермодуляционных искажений сигналов повышение скорости информационного обмена базируется на использовании многоканальных систем и сложных видов модуляции с расширением полосы частот. В тракте радиопередатчика сигналы подвергаются нелинейным искажениям в усилителе мощности и инерционным искажениям при прохождении через фильтрующие цепи, квадратурный модулятор и смеситель.

В работах д.т.н. Борисова В.И., Жидко Е.А., Павлова В.А., Толстых Н.Н. в контексте развития спектрально-эффективных технологий для повышения емкости сетей связи предложены способы защиты радиоэлектронных средств от непреднамеренных помех с использованием пространственно-энергетической адаптации на основе регулирования мощностей передатчиков и применения приемопередающих антенн с изменяющимися показателями пространственной избирательности. В результате обеспечивается перевод систем связи в состояния с минимальными потерями информации за минимально возможное время.

Однако процессы адаптации рассматриваются только применительно к условиям передачи-приема информационных сигналов и не охватывают деструктивные воздействия, обусловленные побочными электромагнитными излучениями и наводками на элементах конструкции аппаратуры. Также в работах указанных авторов не представлены алгоритмы адаптивной идентификации параметров корректоров для многоканальных систем в интересах адаптивной подстройки при старении элементов, изменении условий эксплуатации, сезонных и суточных флуктуаций температуры окружающей среды.

В трудах д.ф.-м.н. Алгазинова Э.К., Бобрешова А.М., Ускова Г.К. представлены результаты моделирования нелинейно-динамических характеристик и линеаризации передающего тракта, а также анализа блокирования, перекрестных и интермодуляционных искажений сигналов на нелинейных полупроводниковых элементах приемных устройств.

Вместе с тем, при реализации предложенных решений остаются открытыми вопросы комплексной оптимизации приемно-передающих систем, необходимой для нормальной с позиций устойчивости и надежности работы центров и комплексов радиосвязи.

Отмеченные обстоятельства определяют противоречие между потребностями разработки и уровнем развития методической базы для повышения спектральной и энергетической эффективности многоканальных систем радиосвязи на основе коррекции нелинейно-динамических характеристик трактов радиопередатчиков.

Таким образом, тема диссертации Бугрова О.В. «Цифровая линеаризация многоканальных систем связи», посвященной разработке моделей и алгоритмов компенсации нелинейно-динамических искажений передающих трактов многоканальных систем радиосвязи, является актуальной.

*Степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.* В диссертации решена научная задача разработке моделей и алгоритмов компенсации нелинейно-динамических искажений передающих трактов многоканальных систем радиосвязи, имеющая значение для развития физических основ усиления и преобразования сигналов, разработки теоретических основ новых методов и систем связи.

Содержание полученных соискателем результатов, сформулированных выводов и рекомендаций, изложено в четырех главах.

В первой главе диссертации с использованием аппарата нейронных сетей построена нелинейно-динамическая модель передающего тракта многоканальной системы и обоснована процедура оптимизации усилителя мощности для достижения наибольшего коэффициента полезного действия при допустимом уровне нелинейных искажений сигналов. Исследованы возможности отражения нелинейно-динамических характеристик передающих трактов с применением рекуррентной нейронной сети и многослойного персептрона с нелинейными функциями активации нейронов. Представлены результаты статистических испытаний имитационных моделей четырех типов многоканальных систем с двумя разновидностями усилителей мощности, реализованных в среде MatLab, и данные натурального эксперимента, подтверждающие теоретически обоснованные условия компенсации продуктов внутриполосной интермодуляции и перекрестной модуляции сигналов.

Во второй главе диссертации решена задача синтеза цифрового корректора для компенсации нелинейно-динамических искажений тракта многоканальных систем и разработаны алгоритмы адаптивного обновления параметров корректора в процессе компенсации искажений. Показано, что за счет организации в передающем тракте обратных характеристик амплитуд и фаз сигналов сохраняется высокий коэффициент полезного действия усилителя мощности при улучшении линейности передающей системы. В результате суммарная передаточная характеристика корректора и усилителя мощности становится линейной. Для поиска коэффициентов корректора использован алгоритм на основе псевдообращения Мура-Пенроуза, отличающийся стабильностью, высокой скоростью сходимости при малых требованиях к вычислительным ресурсам. Многопараметрическая оптимизация радиосистемы выполняется в соответствии с критерием наименьшего среднего квадрата, широкое использование которого в практике разработки аппаратуры обусловлено малой вычислительной сложностью.

В третьей главе диссертации представлены результаты построения поведенческой модели тракта многополосной системы в присутствии квадратурных искажений сигналов в квадратурном модуляторе вследствие амплитудного и фазового дисбаланса. Квадратурные искажения представлены в полиномиальном виде как коэффициенты при сопряженной версии входного сигнала.

По итогам идентификации моделей с применением процедуры Мура-Пенроуза установлено, что моделирование квадратурных искажений сигналов следует осуществлять одновременно с моделированием нелинейно-инерционных искажений с использованием модели многослойного персептрона при фиксации отсчетов на входе и выходе передающего тракта.

В четвертой главе диссертации на основе аналитического представления, имитационного моделирования и обработки данных натурального эксперимента ис-

следованы совместные цифровые корректоры многоканальной системы в присутствии квадратурных искажений и адаптивные алгоритмы для их идентификации. Показано, что компенсацию квадратурного дисбаланса в передающем тракте системы следует осуществлять одновременно с компенсацией нелинейно-инерционных искажений сигнала с использованием единого полиномиального корректора. При этом наибольшая эффективность адаптации для полиномиальной модели достигается при использовании алгоритма сопряженного градиента.

Тематика диссертации Бугрова О.В. соответствует направлениям исследований, определенных паспортом специальности 1.3.4 – Радиофизика (отрасль – физико-математические науки):

- по пункту 1 (в части разработки физических основ усиления и преобразования электромагнитных колебаний);

- по пункту 7 (в части разработки теоретических основ новых методов и систем связи).

К числу наиболее значимых научных результатов работы, на наш взгляд, относятся следующие.

1. Нелинейно-динамическая модель аналогового передающего тракта системы двухполосной параллельной передачи данных и ММО системы, в том числе в присутствии квадратурных искажений.

2. Методика и результаты синтеза цифрового корректора для компенсации нелинейно-динамических и квадратурных искажений тракта многоканальной системы.

3. Алгоритмы адаптивного обновления параметров цифрового корректора при компенсации искажений.

Высокая степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных автором, определяется тем, что они получены с использованием современных методов теории автоматического регулирования, математического моделирования нелинейно-динамических систем и цифровой обработки сигналов. Характеристики исследуемых изделий и закономерности их изменения в зависимости от условий эксплуатации и электромагнитной обстановки подтверждены экспериментальными данными, полученными с использованием сертифицированной программно-вычислительных средств и измерительной аппаратуры.

*Достоверность и новизна научных результатов, выводов и рекомендаций.* Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлена:

- использованием теоретически обоснованных и прошедших практическую апробацию методов исследования;

- строгим подходом к разработке методов и определению показателей эффективности компенсации перекрестных и интермодуляционных искажений сигналов;

- корректным использованием ограничений, допущений и исходных данных, полученных из практики разработки приемно-передающих устройств и выполнения мероприятий по повышению помехозащищенности систем радиосвязи.

Она подтверждается соответствием полученных результатов общим физическим закономерностям, совпадением рассчитанных параметров, характеристик и показателей эффективности функционирования усилителей мощности с экспериментальными данными, а также отдельных результатов, используемых для проведения контрольных расчетов по разработанным моделям и методикам, с результатами, содержащимися в работах других авторов. Технические решения и предложения по построению блоков и узлов радиопередающих трактов, реализованные в макетах, верифицированы в ходе экспериментальных исследований.

Новизна научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, связана с развитием методов исследования и разработки радиопередающих трактов с целью повышения помехоустойчивости передачи информации по радиоканалам за счет компенсации перекрестных и интермодуляционных искажений сигналов.

*Теоретическая значимость работы* определяется развитием методических основ исследования новых методов и средств радиосвязи, открывающих пути совершенствования методов проектирования, конструирования и технологии производства устройств передачи информации по радиоканалам. Реализация полученных соискателем результатов позволяет расширить область применения строгих моделей и методов анализа и синтеза передающих устройств с низким уровнем перекрестных и интермодуляционных искажений сигналов.

Основные результаты диссертации апробированы на международных и всероссийских научно-технических конференциях по тематике исследований, опубликованы в 14 работах, включая 1 статью в издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

*Ценность работы для практики* заключается в том, что приведенные в ней результаты, выводы и рекомендации могут быть использованы для совершенствования компоновочных и проектных решений по конструированию, а также технологий создания радиосистем информационного обмена. Она подтверждена внедрением результатов в организациях федеральных органов исполнительной власти при обосновании перспективных направлений развития и создании устройств радиосвязи.

Предложенные соискателем решения строго аргументированы и критически оценены в сравнении с известными аналогами.

*Замечания и недостатки диссертационной работы.* К наиболее важным замечаниям и недостаткам диссертации, с нашей точки зрения, относятся следующие.

1. При обосновании актуальности темы исследования необходимо представить численные оценки степени несоответствия характеристик применяемых в настоящее время многоканальных систем связи предъявляемым к ним требованиям. Для подтверждения факта достижения цели работы в обязательном порядке должны быть определены численные значения характеристик объекта исследования, улучшение которых позволило удовлетворить предъявляемым требованиям.

2. Для доказательства повышения эффективности многоканальных систем связи в диссертации приведены численные значения характеристик трактов при обоснованных параметрах их конструкций. Вместе с тем, целесообразно было бы сравнить полученные значения с предъявляемыми тактико-техническими требованиями или оценить соответствие показателей эффективности информационного обмена уровням, установленным для систем связи, при реализации разработанных предложений по цифровой линейаризации передающих каналов.

3. Требуется установить более четкое соответствие между формулировками частных задач исследования, полученных научных результатов и их научной новизны. Авторские оценки новизны полученных результатов желательно конкретизировать, более детально указав оригинальные методические приемы, использованные при разработке моделей и методик цифровой линейаризации многоканальных систем связи.

4. При проведении исследований антенны передающих трактов представлялись идеализированными пространственно-частотными фильтрами. Более целесообразно было бы при моделировании представлять их системами с электромагнитным взаимодействием, обусловленным отражением сигналов между композиционными элементами. За счет электромагнитного взаимодействия элементов конструкции антенной системы формируются пространственно-коррелированные помехи с частотно-временными параметрами передаваемых сигналов, которые могут приводить к появлению дополнительных интермодуляционных и перекрестных искажений, способствующих нарушению информационного обмена в системе радиосвязи.

Вместе с тем, отмеченные недостатки, непосредственно не охватывающие основные научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, не снижают общего позитивного впечатления от работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющий вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость результатов.

*Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.* По результатам анализа диссертации Бугрова О.В. «Цифровая линейаризация многоканальных систем связи»

сделаны следующие выводы.

1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача, имеющая значение для совершенствования теоретических основ усиления и преобразования электромагнитных колебаний и разработки новых методов и систем связи. Тема исследования соответствует пунктам 1 и 7 раздела «Направления исследований» паспорта специальности 1.3.4 – Радиофизика (отрасль – физико-математические науки).

2. Диссертация является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные результаты, нашедшие практическое использование при обосновании перспективных направлений развития, создании систем радиосвязи и свидетельствующие о вкладе автора в науку. Предложенные соискателем решения строго аргументированы и критически оценены в сравнении с известными аналогами.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бугров О.В., достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Оппонент выражает согласие на обработку и включение в аттестационное дело соискателя ученой степени своих персональных данных

Оппонент:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник НИИИ (РЭБ)  
ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)

Разиньков Сергей Николаевич

«20» мая 2022 года

Подпись Разинькова С.Н. заверяю

Помощник начальника строевого отдела  
ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)



«21» мая 2022 года

А.Саввин

ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ  
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА  
Н.Е.ЖУКОВСКОГО И Ю.А.ГАГАРИНА» (Г. ВОРОНЕЖ)  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а,  
тлф. 8-(473)-244-78-25, E-mail: vaiu@mil.ru