УТВЕРЖДАЮ
Начальник Воронежского
института МВД России
генерал-майор полиции

_____ А.П. Нахимов
«03» мая 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»

Диссертация «Формирователи спектрально-эффективных радиосигналов с компенсацией амплитудно-фазовых искажений» выполнена на кафедре инфокоммуникационных систем и технологий федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».

Печников Сергей Сергеевич в 2008 году окончил Академию ФСО России по специальности сети связи и системы коммутации, квалификация – инженер. С 2008 года проходил службу в центре информационных технологий, связи и защиты информации Управления Министерства внутренних дел России по Орловской области в должности старшего инженера отделения радиосвязи и видеосистем. В период подготовки диссертационного исследования с 2018 года обучается в очной адъюнктуре федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации» по направлению подготовки 11.07.01 Электроника, радиотехника и системы связи (профиль подготовки 05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения).

Справка об обучении или периоде обучения выдана в 2021 году.

Научный руководитель – Шерстюков Сергей Анатольевич, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации» доктор технических наук, доцент.

На базе федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации» сданы кандидатские экзамены по направлению подготовки 11.07.01 Электроника, радиотехника и системы

связи: иностранный язык (английский) – отлично; история и философия науки – отлично; специальная дисциплина (05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения) – отлично.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы. Современное состояние и развитие радиотехники требует постоянного повышения качества радиоэлектронной аппаратуры, используемой в системах передачи информации, в частности в цифровых системах радиосвязи специального назначения, в связи с чем актуальными задачами продолжают оставаться исследование и разработка эффективных способов и устройств формирования радиосигналов с заданными спектрально-временными параметрами.

В современных стандартах цифровой радиосвязи значительное место среди применяемых радиосигналов занимают сигналы с амплитудно-фазовой модуляцией, что прежде всего объясняется их основным достоинством – высокой спектральной эффективностью. Данная особенность позволяет осуществлять передачу большего объема информации с задействованием минимального частотного ресурса, что особенно важно ввиду ограниченности выделенного частотного диапазона. Негативным аспектом является значительное изменение уровня огибающей данных сигналов, что в совокупности с работой выходного тракта передатчика в режиме, близком к насыщению, служит причиной интермодуляционных искажений и ухудшения электромагнитной совместимости с соседними каналами. В то же время современными тенденциями развития систем связи являются достижение максимального коэффициента полезного действия и увеличение времени автономной работы аккумуляторных батарей портативных средств связи, что достигается за счёт применения нелинейных режимов работы усилителя, а это в свою очередь снижает возможности внедрения спектрально эффективных радиосигналов.

Существует ряд способов, обеспечивающих одновременную реализацию высоких энергетических и качественных показателей сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией. Одним из решений является представление многопозиционного сигнала в виде двух смещённых по фазе сигналов с постоянной огибающей (дефазирование). Сформированные сигналы усиливаются двумя нелинейными высокоэффективными усилителями мощности, а выходные суммируются до того, как сигнал поступает в антенно-фидерный тракт. Такой подход позволяет усилителям мощности работать непрерывно с максимальной эффективностью, сохраняя при этом возможность получения линейного выходного сигнала.

При рассмотрении данных способов в синфазно-квадратурной системе координат можно прийти к выводу, что к исходному входному сигналу добавляется и вычитается широкополосный сигнал смешения, а спектр двух

дополнительных компонент сигнала попадает в соседние каналы, в результате эффективность линейности системы зависит от точного подавления широкополосных сигналов при объединении мощности, а согласование между двумя ветвями усилителей становится критически важным фактором.

В ряде случаев для формирования фазомодулированных составляющих применяют генераторы, управляемые напряжением (ГУН), что в свою очередь может вести к рассинхронизации работы усилительных трактов из-за неидентичности параметров ГУН, а наличие управляемых реактивных элементов и частотно-избирательных цепей не позволяет с их помощью осуществлять фазовую модуляцию без перестройки схемы в достаточно широком диапазоне частот несущего колебания.

На основании изложенного актуальной является задача исследования методов прецизионного преобразования формы спектрально-эффективных радиосигналов для усиления в нелинейных усилителях мощности, основанных на качественно иных принципах формирования сигналов с постоянной огибающей.

Объектом исследования являются устройства формирования спектрально-эффективных радиосигналов, циркулирующих в системах связи специального назначения.

Предметом исследования являются структурные схемы формирователей спектрально-эффективных радиосигналов, их теоретические характеристики и методы компенсации амплитудно-фазовой нестабильности.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является теоретическое обоснование и экспериментальное исследование новых структурных схем формирователей спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющих осуществлять нелинейное усиление мощности и методов компенсации амплитудно-фазовых искажений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ нелинейных искажений радиосигналов в усилителях мощности, критериев оценки их влияния на спектральную эффективность и методов линеаризации передающего тракта.

2. Разработка и исследование структурных схем формирователей узкополосных спектрально-эффективных сигналов.

3. Моделирование и исследование теоретических характеристик формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов.

4. Разработка и исследование методов компенсации амплитудно-фазовой нестабильности в формирователе узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов.

5. Аппаратная реализация формирователя функциональных составляющих на базе ПЛИС и моделирование применения формирователей узкополосных

спектрально-эффективных радиосигналов для линейного усиления в нелинейных усилителях мощности.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы математического и компьютерного моделирования, методы функционального преобразования, численные методы расчета и анализа, векторного исчисления.

В частности, в теоретической части работы используются методы спектрального анализа (в том числе на основе машинных алгоритмов быстрого преобразования Фурье), аппарат рядов Тейлора, функций Бесселя, тригонометрических функций кратного аргумента.

Экспериментальные проверки были произведены с помощью программного обеспечения, реализующего разработанные устройства в системе автоматизированного проектирования (САПР) MathLab, Advanced Design System и Modelsim.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации. Результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора в разработке и исследовании приведённых в работе схем, алгоритмов, методов; в осуществлении моделирования и обработке полученных данных. Научным руководителем, д.т.н., доцентом С.А. Шерстюковым, осуществлялись постановка задач и контроль результатов. Часть опубликованных работ по результатам исследований написана в соавторстве с научным руководителем.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью применения математического аппарата, математическим моделированием, опорой на результаты научных трудов ведущих отечественных и мировых учёных в данной области, совпадением промежуточных результатов с опубликованными в зарубежных источниках результатами некоторых исследований, основанных на проведении натурных испытаний, всесторонними обсуждениями на научных конференциях, публикациями результатов работы в рецензируемых научных журналах

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Структурные схемы формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющие синтезировать выходные сигналы в виде двух фазомодулированных сигналов, отличающихся индексом модуляции, пропорциональным амплитудам модулирующих квадратурных сигналов, и отсутствием дополнительной фазовой корреляции в фазомодулированных составляющих.

2. Метод компенсации амплитудно-фазовой нестабильности в квадратурном модуляторе радиосигналов, позволяющий минимизировать возникновение паразитной амплитудной и паразитной фазовой модуляции,

отличающийся использованием компенсационных сигналов, синтезированных формирователем функциональных составляющих.

3. Полученные в результате моделирования спектральные характеристики и результаты анализа параметрической чувствительности формирователей узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов, позволяющие оценить точность выполняемых преобразований.

4. Устройство формирования функциональных составляющих на базе ПЛИС, отличающееся минимальными аппаратными затратами и применением компенсации амплитудно-фазовых искажений в петле обратной связи.

Практическая ценность результатов. Разработанные устройства внедрены в учебный процесс Воронежского института МВД России на кафедре инфокоммуникационных систем и технологий, подтверждены актом внедрения. Использованы при выполнении научно-исследовательских работ «Исследование вопросов по организации радиосвязи в ВЧ-диапазоне в интересах ГУ МВД России по Воронежской области» (п. 4 Плана научной деятельности Воронежского института МВД России на 2019 г.), «Разработка рекомендаций по сопряжению систем IP-телефонии и цифровых систем радиосвязи стандарта DMR» (п. 4 Плана научной деятельности Воронежского института МВД России на 2020 г.).

Результаты проведённых исследований применяются в конструкторских разработках при модернизации существующих систем связи, что подтверждается актами внедрения в процесс исследования и разработки ОАО «Концерн «Созвездие», ФГУП «НТЦ Орион» ФСБ России.

Ценность научных работ соискателя заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы в ОКР на предприятиях, занимающихся производством систем радиосвязи, что позволяет решать научные и практические задачи повышения качества и расширения функциональных возможностей разрабатываемого оборудования.

Соответствие диссертации требованиям, установленным пунктом 14 Положения о присуждении ученых степеней. В диссертации соискатель ссылается на авторов и (или) источники заимствования материалов или отдельных результатов. При использовании результатов научных работ, выполненных соискателем ученой степени лично и (или) в соавторстве, соискатель отмечает это обстоятельство.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. По результатам работы над диссертацией опубликовано 26 работ (основной является 21), 6 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России [5-10], 4 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus [1-4]; 14 материалов научных конференций и статей в научных журналах [13-26], 2 заключительных отчета о научно-исследовательской работе [27, 28], в том числе 8 работ опубликовано без

соавторов [8, 15, 16, 19, 22, 23, 25, 26]. Разработана 1 программа для ЭВМ [11] и подана 1 заявка для получения патента на изобретение [12], зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция IEEE «Системы синхронизации, генерации и обработки сигналов в телекоммуникациях» (Светлогорск, 2020); Международная научно-техническая IEEE «Системы формирования и обработки сигналов в области бортовой связи» (г. Москва, 2021); Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» (г. Москва, 2021); Международная научно-практическая конференция «Охрана, безопасность, связь» (Воронеж, 2018–2020); Международная научно-практическая конференция «Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии» (Воронеж, 2019–2020); Международная научно-техническая конференция «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (Воронеж, 2019); Всероссийская научно-практическая конференция курсантов, слушателей, адъюнктов и молодых специалистов «Актуальные вопросы эксплуатации систем охранного мониторинга и защищенных телекоммуникационных систем» (Воронеж, 2019–2021); Всероссийский семинар «Актуальные проблемы и перспективы развития систем связи ОВД» (Воронеж, 2020); Всероссийская научно-практическая конференция «Математические методы и информационно-технические средства» (Краснодар, 2020); Всероссийская научно-практическая конференция «Авионика 2020» (Воронеж, 2020); Межведомственный семинар «Эффективность и живучесть радиотехнических устройств ИМТС МВД России при угрозах информационной безопасности». (Воронеж, 2019); Межведомственный семинар «Состояние и перспективы развития инфокоммуникационных систем» (Воронеж, 2020); Научно-практическая конференция «Молодежные чтения, посвященные памяти Ю.А. Гагарина» (Воронеж, 2021).

Научная специальность, которой соответствует диссертация. Результаты исследования соответствуют п. 3 «Разработка устройств генерирования, усиления, преобразования радиосигналов в радиосредствах различного назначения. Создание методик их расчета и основ проектирования», п. 7 «Разработка методов и устройств передачи, приема, обработки, отображения и хранения информации» и п. 10 «Разработка радиотехнических устройств для использования их в промышленности, биологии, медицине, метрологии и др.» паспорта научной специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Шерстюков С.А. Способ повышения спектральной эффективности радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. – № 2. – С. 155–164.

2. Шерстюков С.А. Исследование предмодуляционного тракта аппаратно-программного комплекса «Форком» / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. – № 4. – С. 158–164.

3. Шерстюков С.А. Моделирование способа компенсации искажений радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией в квадратурном формирователе / С.А. Шерстюков, С.С. Печников, А.Н. Буравцова // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 2. – С. 182–192.

4. Печников С.С. Анализ процесса линеаризации радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией методом подавления и восстановления огибающей / С.С. Печников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 1. – С. 169– 178.

5. Pechnikov S.S. Analysis of the parametric sensitivity of the method for optimizing the structure of spectrally effective radio signals / S.S. Pechnikov, S.A. Sherstukov // TComm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – № 3. – С. 50–58.

6. Шерстюков С.А. Аппаратная реализация на базе ПЛИС компенсатора амплитудно-фазовых искажений, входящего в состав формирователя спектрально-эффективных радиосигналов // С.А. Шерстюков, С.С. Печников, Е.В. Шаталов // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2020. – № 2. – С. 42–50.

Патент на изобретение:

7. Печников С.С. Способ и устройство преобразования структуры спектрально-эффективных радиосигналов для усиления в нелинейных усилителях мощности : заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение от 18.12.2020 № 2020142008 / С.С. Печников. – Москва : ФИПС, 2021.

Регистрация программы для ЭВМ:

8. Печников С.С. Компенсатор амплитудно-фазовых искажений с использованием формирователей функциональных составляющих на базе ПЛИС:

свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 13.04.2021 № 2021615783 / С.С. Печников. – Москва : ФИПС, 2021.

В международных и иных изданиях:

9. Pechnikov S.S. Optimization of the Structure of Spectral-Effective Radio Signals on the Basis of Functional Converters and Vector Modulators in the Composition of the Predistortion Tract / S.S. Pechnikov, S.A. Sherstukov // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – Svetlogorsk, Russia, 2020, P. 1-5, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166070.

10. Sherstukov S.A. A method of compensating distortion of radio signals with amplitude-phase modulation in a quadrature driver / S.A. Sherstukov, Pechnikov S.S., A.N. Buravtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations (2020). – 2020. – 22038.

11. Sherstukov S.A. Operation algorithms and application of functional converters modulating voltage for generation of precision radio signals with angular modulation / S.A. Sherstukov, A.N. Buravtsovs, S.S. Pechnikov, D.S. Tolstykh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia, (2020). – 2020. – 52008.

12. Pechnikov S.S. Transforming the structure of spectrally effective radio signals for amplification in nonlinear power amplifiers / S.S. Pechnikov, S.A. Sherstukov // 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. – Moscow, Russia, 2021, P. 1-5, DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416021

13. Шерстюков С.А. Повышение энергетических свойств радиопередающих устройств, формирующих высокоэффективные радиосигналы с цифровой модуляцией / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Охрана, безопасность, связь. – 2019. – № 4-2 (4) – С. 96–103.

14. Шерстюков С.А. Анализ способа LINC-преобразования радиосигналов с амплитудно-угловой модуляцией / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Охрана, безопасность, связь – 2020. – № 5-3. – С. 138–143.

15. Печников С.С. Вопросы применения высокоэффективных методов модуляции в системах цифровой радиосвязи / С.С. Печников // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем : сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2019. – С.33–39.

16. Печников С.С. Увеличение времени работы средств радиосвязи, стоящих на вооружении в органах внутренних дел / С.С. Печников // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2019. – № 5-2. – С. 180–84.

17. Шерстюков С.А. Проблемы технического сопряжения стандартов систем радиосвязи в предмодуляционном и усилительном трактах / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2019. – № 5-2. – С. 207–212.

18. Лукьянов А.С. Оптимизация отношения сигнал/шум при цветных шумах /А.С. Лукьянов, С.С. Печников, А.В. Попов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2019. – № 1 (28). – С. 4–7.

19. Печников С.С. Вопросы сопряжения стандартов систем радиосвязи / С.С. Печников // Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией : сборник научных статей по материалам III Международной научно-технической конференции ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. – Воронеж, 2019. – С.141–143.

20. Лукьянов А.С. Перспективы развития адаптивной системы радиосвязи и применение в сетях связи ведомственных структур / А.С. Лукьянов, С.С. Печников, И.В. Гилев // Математические методы и информационно-технические средства : сборник научных статей по материалам XV Всероссийской научно-практической конференции. – Краснодар, 2019. – С.114 –117.

21. Печников С.С. Моделирование системы усиления с декартовой обратной связью / С.С. Печников, А.С. Лукьянов // Авионика : сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2020. – С. 287 – 290.

22. Печников С.С. Анализ воздействии двухтонального сигнала на нелинейный усилитель мощности / С.С. Печников // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем : сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2020. – С. 28–30.

23. Печников С.С. Моделирование нелинейного режима усиления сигнала формируемого квадратурным модулятором при воздействии 2-тонального колебания / С.С. Печников // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2020. – № 6-2. – С. 186–189.

24. Шерстюков С.А. Оптимизация структуры спектрально-эффективных радиосигналов на базе функциональных преобразователей и векторных модуляторов в составе тракта предыскажения / С.А. Шерстюков, С.С. Печников // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов.– 2020. – № 2. – С. 4–10.

25. Печников С.С. К вопросу эффективности использования источника питания / С.С. Печников // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС : сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2020. – С. 193–197.

26. Печников С.С. Количественная оценка точности формирования спектрально-эффективных радиосигналов с использованием глазковых диаграмм колебания / С.С. Печников // REDS: телекоммуникационные устройства и системы. – 2021. – №3. – С.58 –65.

Отчеты о НИР:

27. Рекомендации по использованию технических средств и организации радиосвязи в диапазоне ВЧ : отчет о НИР / А.И. Климов, С.А. Шерстюков, М.А. Галуза, С.С. Печников. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2020. – 35 с.

28. Сопряжение систем IP-телефонии и цифровых систем радиосвязи стандарта DMR / С.А. Шерстюков, Д.С. Толстых, С.С. Печников, А.Н. Лукьянова. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2020. – 35 с.

Выводы:

Диссертация «Формирователи спектрально-эффективных радиосигналов с компенсацией амплитудно-фазовых искажений» оформлена в соответствии с пунктом 24.1 Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук и с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым Положением о присуждении ученых степеней к кандидатским диссертациям, в том числе п. 9, является научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, посвященная разработке формирователей узкополосных радиосигналов с амплитудно-фазовой модуляцией, позволяющих, в широком смысле, повысить энергетическую эффективность усилителей мощности, а в узком смысле – повысить линейность амплитудных и фазовых модуляционных характеристик. Новые алгоритмы и структурные схемы формирователей отличаются от известных использованием в предмодуляционном тракте функциональных преобразователей вместо устройств предыскажения, что позволяет снизить сложность аппаратной реализации и повысить качество формируемых радиосигналов.

Диссертация «Формирователи спектрально-эффективных радиосигналов с компенсацией амплитудно-фазовых искажений» Печникова Сергея Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры инфокоммуникационных систем и технологий.

Присутствовали на заседании 15 человек, в том числе 7 докторов наук (в том числе по специальности 05.12.04 – 3 человека), 7 кандидатов наук (в том числе по специальности 05.12.04 – 3 человека).

Результаты голосования: «за» – 15 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0 человек, протокол № 16 от 29 апреля 2021 г.

Председательствующий
на расширенном заседании кафедры
начальник кафедры
инфокоммуникационных систем и технологий
Воронежского института МВД России
кандидат технических наук, доцент С.С. Никулин

Подпись С.С. Никулина заверяю

Учёный секретарь
учёного совета Воронежского
института МВД России
кандидат юридических наук, доцент О.В. Гороховцев

Заключение соответствует установленным требованиям.

Учёный секретарь
учёного совета Воронежского
института МВД России
кандидат юридических наук, доцент О.В. Гороховцев