

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Бугрова Олега Владимировича

«Цифровая линейаризация многоканальных систем связи», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Растущие потребности к скорости передачи данных в современных системах связи стимулируют применение сложных методов модуляции, а также накладывают жесткие требования к ограниченности сигнала в частотном диапазоне. Для работы в таких условиях необходимы усилители мощности, обладающие достаточным динамическим диапазоном и линейностью для передачи с низким уровнем нелинейных искажений сложных сигналов с высоким значением пик-фактора. С другой стороны, современный усилитель мощности должен быть энергоэффективным и обладать высоким коэффициентом полезного действия, который достигается в таком режиме работы, при котором нелинейные искажения значительно возрастают. Решением этого противоречия может выступать метод цифровых предискажений. Для дальнейшего повышения скорости передачи данных можно использовать многоканальные системы, с частотным или пространственным разделением каналов, которые расширяют задачу линейаризации ввиду появления свойственных только этим системам перекрестным искажениям, вызванных взаимным влиянием каналов системы друг на друга. Об актуальности приведенных проблем свидетельствуют многочисленные публикации на эту тему в зарубежной печати. Таким образом, можно утверждать, что диссертационная работа Бугрова О.В. посвящена актуальной тематике.

К числу наиболее значимых **научных результатов**, полученных соискателем, относятся:

1. Автором предложены нейросетевые модели передающего тракта многоканальных систем, обладающего нелинейно-инерционными свойствами, позволяющие в сравнении с известными аналогами повысить качество поведенческого описания исследуемого устройства.

2. Разработан адаптивный алгоритм цифровой линейаризации передающего тракта на основе метода сопряженного градиента, позволивший значительно сократить количества вычислительных операций.

3. Разработана совместная адаптивная система управления цифровым корректором для одновременной компенсации квадратурных и нелинейно-инерционных искажений в передающем радиотракте на основе двумерной полиномиальной модели «с памятью» и метода сопряженного градиента.

**Обоснованность и достоверность** научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается строгостью доказательств, а также применением современных методов компьютерного моделирования нелинейно-динамических систем, численных методов расчета и анализа, цифровой обработки сигналов. Все аналитические выкладки подтверждаются компьютерными и практическими экспериментами.

**Новизна и оригинальность** полученных в работе результатов подтверждается наличием достаточного количества публикаций в ведущих рецензируемых журналах из перечня Scopus и ВАК, наличием свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

**Значимость работы** Бугрова О.В. состоит в расширении области применения цифрового метода линейаризации передающих СВЧ трактов в многоканальных системах связи.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что предложенные нейросетевые модели позволяют значительно повысить точность поведенческого описания передающих трактов, а предлагаемая система адаптивной цифровой линейаризации позволяет увеличить энергетическую эффективность системы связи.

Диссертация Бугрова О.В. написана четким и ясным языком, хорошо структурирована. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Вместе с тем, по диссертационной работе можно сделать некоторые замечания.



1. Коррекция искажений вызывает увеличение пик-фактора сигнала, что уменьшает коэффициент полезного действия и повышает требования к линейности усилителя мощности. В диссертации этот эффект не учитывается, что не позволяет оценить энергетическую эффективность усилителя мощности в целом.

2. Используемая соискателем полиномиальная модель нелинейных инерционных искажений (1.4), (1.14) не позволяет оценить нелинейные искажения сигналов с постоянной амплитудой BPSK, QPSK, возникающие в результате их взаимодействия в многоканальной системе, что снижает степень общности получаемых результатов.

3. Инерционные искажения узкополосных радиосигналов в усилителях мощности задаются сдвигом фазы, который мало изменяется в полосе частот сигнала. Поэтому использование рядов Вольтерры приводит к необоснованному увеличению числа коэффициентов корректирующего фильтра.

4. В диссертационной работе указано, что одной из основных задач исследования является повышение энергетической эффективности. Вместе с тем энергетическая эффективность оценивается только косвенно путем логических заключений без количественного анализа коэффициента полезного действия.

5. В диссертационной работе имеются недостатки, по-видимому редакционного характера, например: на с. 58 делается ссылка на схему эксперимента рис. 2.10, а в действительности на рис. 2.10 приведены амплитудно-амплитудные характеристики, выражение для NMSE (1.21) записано с ошибкой.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней.**

На основе анализа диссертации Бугрова О.В. «Цифровая линейризация многоканальных систем связи» можно сделать следующие выводы:

1. Диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача по разработке моделей, эффективных алгоритмов и методов компенсации нелинейно-динамических искажений передающего аналогового тракта многоканальных систем радиосвязи СВЧ диапазона, имеющая важное практическое значение.

2. Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Бугров Олег Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой радиотехнических устройств

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

д.т.н., профессор

«17» 05 2022 г.

Ю.Н. Паршин

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

кафедра радиотехнических устройств

Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Телефон: +7(4912)72-03-48

E-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

Подпись профессора Ю.Н. Паршина удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

к.ф.м.н., доцент



К.В. Бухенский