



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**
«Национальный исследовательский центр
телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева»

(ФГАУ НИЦ Телеком)

ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827

ИНН/КПП 9709082715/770901001

29.05.2025 № 010/2619

На № 1884 от 13.05.2025

Отзыв ведущей организации

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
ФГАУ НИЦ Телеком по науке,
кандидат технических наук, доцент



А.А. Захаров

2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - **Федерального государственного автономного учреждения «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева»** на диссертационную работу Грычкина Сергея Евгеньевича «Исследование и разработка высокоэффективных модуляционных устройств передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

1. Актуальность темы исследования

Увеличение коэффициента полезного действия (КПД) передающего тракта, как наиболее энергоемкого узла радиопередатчика представляет собой актуальную задачу как для мощных устройств, применяемых в цифровом теле- и радиовещании, так и для передатчиков портативной абонентской РЭА и необслуживаемой аппаратуры передачи данных, в том числе Интернета Вещей (IoT). Наибольший КПД активных приборов достигается в ключевых режимах работы (классы D, E, F). Для усиления современных спектрально-эффективных вещательных и телекоммуникационных сигналов с переменной амплитудой (например, OFDM - Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) использование ключевых режимов работы возможно только при применении «синтетических» методов усиления, таких как дефазирование или метод раздельного усиления составляющих Л. Кана, а также их комбинаций. Наиболее

Вход. № 64/25
«29» 05 2025 г.
подпись

перспективный из этих методов – метод раздельного усиления составляющих (Envelope Elimination and Restoration, EER), успешно применяемый в области мощного радиовещания в низкочастотном (НЧ), среднечастотном (СЧ) и высокочастотном (ВЧ) диапазонах, является объектом большинства исследований, направленных как на повышение рабочей частоты, так и на расширение полосы модулирующих частот. Однако применение синтетических методов усиления в диапазоне ОВЧ сопряжено с технологическими ограничениями в силу более высоких рабочих частот и большей ширины полосы частот используемых сигналов. Преодолеть их можно используя комбинирование различных синтетических методов высокоэффективного усиления, одно из направлений развития которых рассматривается в настоящей работе.

Для наиболее перспективных для использования в диапазоне ОВЧ усилителей мощности с раздельным усилением составляющих (УМРС), КПД которых определяется как произведение КПД ключевого высокочастотного и модуляционного с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) трактов, уточняется методика расчета потерь мощности модуляционного тракта при применении новой элементной базы и исследуется возможность уменьшения энергетических потерь при динамическом квантовании напряжения питания.

Таким образом, сформулированная в диссертации научная проблема – снижение мощности потерь в высокоэффективных модуляционных устройствах для радиопередатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ с раздельным усилением составляющих является актуальной. Решение указанной проблемы позволит реализовать расширение методов построения и практик проектирования высокоэффективных модуляционных устройств, для радиопередатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ с раздельным усилением составляющих.

Основное внимание в работе уделено в обосновании возможности повышения КПД и снижения мощности потерь посредством использования комбинированного синтетического метода раздельного усиления с ШИМ модулятором с оптимизированными порогами квантования напряжения питания.

Для решения этой задачи в работе решается комплекс взаимосвязанных частных научных задач:

- проводится анализ известных синтетических методов усиления, пригодных для построения высокоэффективных передатчиков ЦРВ диапазона ОВЧ, схемотехники и режимов работы применяемых в их высокочастотном и модуляционном трактах ключевых усилителей мощности;
- разрабатываются модели и проводится имитационное компьютерное моделирование ШИМ-модулятора на GaN транзисторах;
- разрабатывается уточненная аналитическая методика расчета потерь мощности в ШИМ-модуляторах на современной элементной базе;

- проводится теоретическое исследование энергетических характеристик многоуровневого GaN FET (Gallium nitride Field-Effect Transistor) ШИМ модулятора и оптимизация порогов квантования по критерию минимума средних потерь мощности для различных распределений амплитуд огибающей сигналов ЦРВ;

- проводится экспериментальное исследование ШИМ-модулятора с квантованием напряжения питания.

2. Структура и основные результаты работы

Диссертация содержит введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, два приложения, 125 страниц и 4 страницы приложений, иллюстрируется 45 рисунками и имеет 3 таблицы. Список литературы состоит из 75 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные направления исследований.

В **первом разделе** предложена оригинальная классификация комбинирования синтетических методов линейного усиления. Показано, что для усиления сигналов с высоким пик-фактором наиболее перспективным является применение УМРС с квантованием напряжения питания. Проведённое рассмотрение способов построения ШИМ-модуляторов показало перспективность использования GaN FET транзисторов и квантования напряжения питания.

Во **втором разделе** разработана уточненная методика расчета потерь в ШИМ модуляторе на GaN FET транзисторах с технологией НЕМТ, в которой, в дополнении к рекомендациям производителей компонентов, учтены коммутативные потери. Сравнение результатов теоретического анализа и имитационного моделирования усилителя с ШИМ на GaN FET транзисторах проводилось на примере интегральной микросхемы (ИМС) LMG5200 (80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage) фирмы-изготовителя Texas Instruments (США). Проведённое имитационное компьютерное моделирование работы интегральной микросхемы LMG5200В в качестве ШИМ модулятора показало хорошее совпадение разработанной уточненной методики расчета потерь с результатами моделирования.

В **третьем разделе** проведена оптимизация порогов квантования многоуровневого ШИМ модулятора на GaN НЕМТ транзисторах по критерию минимума средних потерь для различных значений параметра масштаба Релеевского распределения амплитуд огибающей сигнала. Оптимизация порогов квантования показала, что основной выигрыш в снижении средней рассеиваемой мощности может быть достигнут при использовании всего двух напряжений питания. Рассмотрение принципов практической реализации предлагаемого

способа повышения среднего КПД модуляционного устройства передатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ показало возможность его осуществления.

В **четвёртом разделе** показано, что разработанная и созданная экспериментальная установка на основе отладочной платы LMG5200EVM-02 обладает достаточной точностью для исследования статических энергетических характеристик усилителя с ШИМ при различных напряжениях питания в режимах работы, соответствующих расчётным. Проведенное экспериментальное исследование ШИМ-модулятора на GaN FET транзисторах с технологией HEMT подтвердило целесообразность использования разработанной уточненной методики аналитического расчета потерь мощности, а также результаты имитационного компьютерного моделирования.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В приложениях к работе представлено 2 акта об использовании результатов диссертационной работы и полученные 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3. Научная новизна работы

- показано, что для построения высокоэффективных передатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ целесообразно использование комбинации синтетического метода с отдельным усилением составляющих и многоуровневой ШИМ модуляцией с квантованием напряжения питания обеспечивающей существенное снижение мощности потерь.

- разработана уточненная аналитическая методика, учитывающая дополнительные факторы потерь мощности в ШИМ-модуляторах на GaN транзисторах.

- разработана методика оптимизации порогов квантования напряжения питания по критерию минимума потерь мощности для высокоэффективных многоуровневых ШИМ модуляторов, усиливающих сигналы огибающей с Рэлеевским распределением.

- показано, что основной выигрыш в снижении средней мощности потерь может быть достигнут при использовании всего двух уровней напряжений питания.

4. Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость диссертации заключается в обосновании возможности повышения КПД и снижения мощности потерь посредством использования комбинированного синтетического метода отдельного усиления с ШИМ модулятором с оптимизированными пороговыми значениями квантования напряжения питания, разработки методики проектирования подобных устройств.

5. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Результаты работы достоверны, что подтверждается корректностью использования математического аппарата, соответствием результатов разработанных методик расчета с результатами имитационного компьютерного моделирования и проведенных экспериментальных исследований. Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами, в том числе на научных конференциях.

6. Личный вклад автора

Результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту и составляющие основное содержание работы, разработаны и получены автором лично. В опубликованные научные труды диссертантом внесен основной вклад в части проведения имитационного моделирования и экспериментального исследования, обработки полученных результатов и формулировки выводов и рекомендаций, а также предложения новых технических решений. Вклад соавторов научных трудов ограничивался постановкой задачи и обсуждением результатов.

7. Соответствие паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует п. 1. "Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем", п. 4. "Разработка и исследование устройств генерирования, усиления, преобразования и синтеза радиосигналов, сигналов изображения и звука в радиотехнических системах различного назначения, включая системы телевидения. Создание эффективных методов их расчета и основ проектирования".

8. Апробация результатов работы

Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами на научных конференциях, подготовлено 3 доклада. Основные результаты диссертационной работы отражены в 4 работах в журналах, включенных в перечень ВАК, 3 работы проиндексированы в базах данных SCOPUS.

9. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Разработанные Грычкиным Сергеем Евгеньевичем уточненная аналитическая методика расчета мощности потерь в ШИМ-модуляторах на GaN транзисторах и методика оптимизации порогов квантования напряжения питания по критерию минимума потерь мощности для высокоэффективных многоуровневых ШИМ модуляторов могут быть применены в радиопередатчиках ОВЧ диапазона с отдельным усилением составляющих для существенного увеличения КПД.

10. Замечания по диссертационной работе

К замечаниям по результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Целесообразно более детально указать связь между предметом, объектом и целью исследования.

2. В работе не рассмотрено применение разработанной методики оптимизации порогов квантования напряжения питания по критерию минимума потерь мощности для высокоэффективных многоуровневых ШИМ модуляторов при применении синтетического метода дефазирования, что могло бы расширить возможные области применения разработанной методики.

3. В диссертации не пояснены обозначения L_0 , C_0 , L_{ch} элементов схемы, приведенной на Рисунке 1.7.

4. Некорректно использованы обозначения единицы измерения времени "T(Secs)" на Рисунке 2.6.

5. В работе имеются некоторые недочёты редакционного характера (например, стр. 6).

Указанные недостатки не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы, защищаемые положения которой обладают научной новизной и практической значимостью.

11. Заключение

Диссертационная работа Грычкина Сергея Евгеньевича является законченной научной квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на актуальную тему и на достаточном научном уровне. Автореферат диссертации соответствует самой работе. По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает п. 9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 "Положение о присуждении ученых степеней", а ее автор, Грычкин Сергей Евгеньевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения".

Отзыв подготовила:

Иванкович Мария Владимировна, кандидат технических наук, 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», заместитель директора Цента исследования перспективных беспроводных технологий связи, Федерального государственного автономного учреждения «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева» (ФГАУ НИЦ Телеком), Россия, 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 16, Тел.: +7 (495) 647-17-77, доб. 2651, e-mail: ivankovichmv@nic-t.ru.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на заседании секции научно-технического совета НТЦ Анализа электромагнитной совместимости ФГАУ НИЦ Телеком 23.05.2025, протокол № 035-25-05-01.

Заместитель директора ЦИ ПБТС, к.т.н.



М.В. Иванкович

«23» мая 2025 г.

Подпись М.В. Иванкович заверяю

Директор службы персонала ФГАУ НИЦ Телеком




В.А. Тютюнова

«23» мая 2025 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошечева» (ФГАУ НИЦ Телеком).

Адрес: 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 16.

Веб-сайт: www.nic-t.ru/.

Тел.: (495) 647-17-77.

Адрес электронной почты: info@nic-t.ru.