

На правах рукописи

**Грычкин Сергей Евгеньевич**

**Исследование и разработка высокоэффективных модуляционных устройств  
передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ**

Специальность 2.2.13

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: Варламов Олег Витальевич – доктор технических наук, доцент, начальник НИО «Отдел организации научной работы и публикационной активности» МТУСИ, профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника"

Официальные оппоненты: Сороцкий Владимир Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института электроники и телекоммуникаций Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Родин Михаил Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева» (ФГАУ НИЦ Телеком)

Защита диссертации состоится «17» июня 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при МТУСИ по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-211, тел. +7(495) 957-78-70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: <https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-Grychkin/dis-Grychkin.pdf>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 55.2.002.01, д.т.н., доцент

М.В. Терешонок

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время в большинстве стран Западной Европы, США, Австралии, Саудовской Аравии и других стран, происходит переход на системы цифрового радиовещания (ЦРВ) различных стандартов. В Российской Федерации проведены исследования и пробная эксплуатация в опытных зонах трех систем ЦРВ, на основании результатов которых приняты решения Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) о возможности их развертывания и выделении частотного ресурса. Так, в 2018 году решением ГКРЧ выделены диапазоны частот для цифрового звукового радиовещания стандарта DRM+ (Digital Radio Mondiale) и DAB+ (Digital Audio Broadcasting), а в 2019 году – для российской инновационной системы цифрового наземного звукового и мультимедийного радиовещания стандарта РАВИС (RAVIS, Real-time Audio Visual Information System). Эти решения ГКРЧ, а также принятые в России национальные стандарты в области систем ЦРВ, позволяют организовывать сети ЦРВ. Исследования в области ЦРВ продолжаются в настоящее время. Все перечисленные выше системы цифрового радиовещания работают в диапазоне частот ОВЧ и используют сигналы с OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - ортогональным частотным разделением каналов с мультиплексированием, которые характеризуются большим значением пик-фактора (10-12 дБ) и, в отличие от традиционных систем вещания в диапазоне ОВЧ с частотной модуляцией, предъявляют высокие требования к линейности усилителей мощности (УМ) передающей аппаратуры.

Качество функционирования систем ЦРВ во многом определяется параметрами радиопередающей аппаратуры. Внедрение ЦРВ, безусловно, потребует замены радиопередающей аппаратуры, не пригодной или не оптимизированной для таких систем, а также выработавшей свой ресурс.

К радиопередатчику, как наиболее энергоемкой части радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), предъявляются требования повышения энергетической эффективности (КПД) при одновременном улучшении функциональных параметров. Наибольшая потребность в разработке высокоэффективных передатчиков РЭА актуальна для мощных устройств, применяемых в цифровом

теле- и радиовещании, а также для передатчиков портативной абонентской РЭА и необслуживаемой аппаратуры передачи данных, в том числе Интернета Вещей (IoT). Именно для таких классов передатчиков необходимо в первую очередь повышать энергетическую эффективность. Действительно, повышение КПД радиопередатчиков позволяет улучшить тепловой режим за счет упрощения отвода тепла, что, в свою очередь, уменьшает массу и габариты, а также увеличивает надежность РЭА. Для устройств большой мощности, и особенно при значительном их количестве, повышение КПД также обуславливает снижение эксплуатационных расходов. В связи с этим повышение энергетической эффективности передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ актуально.

Линейные высокочастотные тракты, основанные на существующих принципах построения и элементной базе, и обладающие КПД 8-15%, уже не удовлетворяют растущим требованиям к техническим характеристикам, необходимым для систем ЦРВ, в том числе по энергоэффективности. В них высокая линейность УМ достигается за счет низкого КПД. Для обеспечения большего КПД переходят к применению ключевых режимов работы УМ в передатчике. Классическое применение двухтактного каскада усиления мощности, работающего в классе С, позволяет получить КПД порядка 60-70%, а применение ключевых режимов работы увеличивает КПД на 20-25%, и результирующий КПД составляет 80-90%. Классы ключевых усилителей широко описаны в литературе, и их исследование продолжается в настоящее время.

Однако непосредственно в ключевом режиме могут усиливаться только сигналы с постоянной амплитудой (с частотной либо фазовой модуляцией). Для сигналов с переменной амплитудой используют синтетические методы усиления. Среди них наиболее перспективными можно считать метод дефазирования, схему Догерти, и метод раздельного усиления (EER - Envelope Elimination and Restoration или метод Кана). Разработка и применение синтетических методов высокоэффективного усиления была начата с систем мощного радиовещания в диапазонах НЧ, СЧ и ВЧ, где повышение КПД приводило к существенной экономии потребляемой электроэнергии и, соответственно, к снижению стоимости вещания. Хотя передатчики ЦРВ имеют меньшую мощность по

сравнению с аналоговыми, применение синтетических методов усиления с целью повышения КПД для них также актуально. 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 отдельным 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.

**Степень разработанности темы.** Принципы построения радиопередатчиков, в основе которых используются импульсные (ключевые) усилители мощности и синтетические методы усиления, были заложены такими учеными как Агеев Д.В., Артым А.Г., Варламов О.В., Козырев В.Б., Попов И.А., Kazimierczuk M.K., Raab F.H., Sokal N.O. и другими. Применение динамического квантования напряжения питания в последние годы в основном рассматривалось для усилителей с автоматической регулировкой режима (APR, Envelope Tracking, ET) и для усилителей с дефазированием. Вопросы исследования характеристик модуляционных устройств с ШИМ для передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ с отдельным усилением составляющих при динамическом квантовании напряжения питания, и оптимизации их параметров ранее в отечественной и зарубежной литературе не рассматривались.

**Цель работы.** Снижение мощности потерь в высокоэффективных модуляционных устройствах для радиопередатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ с отдельным усилением составляющих.

**Научная задача исследования** заключается в обосновании возможности повышения КПД и снижения мощности потерь посредством использования комбинированного синтетического метода отдельного усиления с ШИМ

модулятором с оптимизированными порогами квантования напряжения питания.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи в работе требуется решить комплекс взаимосвязанных частных научных задач:

1. 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.

2. Разработка модели и проведение имитационного компьютерного моделирования ШИМ-модулятора на GaN транзисторах.

3. Разработка уточненной аналитической методики расчета потерь мощности в ШИМ-модуляторах на современной элементной базе.

4. 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.

5. Экспериментальное исследование ШИМ-модулятора с квантованием напряжения питания.

**Объектом исследования** является многоуровневый модуляционный тракт на GaN FET транзисторах радиопередатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ.

**Предметом исследования** являются конфигурации, параметры и энергетические показатели усилительного тракта с отдельным усилением составляющих и ключевым режимом работы, многоуровневого модулятора передатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ.

**Методология и методы исследования.** При решении задач диссертационной работы использовались методы теории электрических цепей, радиотехнические методы, численные методы решения уравнений, методы имитационного схемотехнического моделирования с использованием ЭВМ, экспериментальные методы.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. 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.

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

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

4. Показано, что основной выигрыш в снижении средней мощности потерь (до трех раз) может быть достигнут при использовании всего двух уровней напряжений питания. При использовании четырех уровней напряжений питания, средняя мощность потерь снижается более чем в 4 раза. Использование числа уровней

5. напряжений питания более четырех признано нецелесообразным ввиду непропорционального достигаемому результату усложнению схемотехники.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанных методике расчета мощности потерь и методике оптимизации порогов квантования напряжения питания по критерию минимума потерь мощности в многоуровневых ШИМ модуляторах на GaN транзисторах для высокоэффективных передатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ.

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 квантованиями напряжения питания, разработки методики проектирования подобных устройств. Результаты исследования могут использоваться в работе проектных и исследовательских организаций для улучшения эксплуатационных характеристик радиопередатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ, а также при разработке и проектировании аппаратуры систем радиовещания и радиосвязи различного назначения.

Основные результаты диссертации внедрены в АО «Концерн Гранит», ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», что подтверждается актами о внедрении.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью использования математического аппарата, соответствием результатов разработанных методик расчета с результатами имитационного компьютерного моделирования и проведенных экспериментальных исследований.

Результаты работы докладывались и обсуждались на XIV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (2020 г.), и международных конференциях Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (2021 г.), Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (2023 г., 2024 г.), [35-37, 40], а также вошли в отчет по научно-исследовательской работе [41].

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, из них 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и 3 статьи в сборниках, индексируемых базой данных Scopus, получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад.** Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертационную работу вошла только часть, которая выполнена лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа содержит введение, четыре раздела, заключение, список литературы и приложения. Объем работы составляет 129 страниц, 45 рисунков и 3 таблицы. Дополнительные сведения изложены на 4 страницах в приложениях. В список литературы включено 75 источников.

**Соответствие паспорту специальности.** Результаты исследования соответствуют паспорту научной специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» по пунктам:

- 1: Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих



повысить эффективность радиотехнических устройств и систем;

- 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.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Для построения высокоэффективного передатчика ЦРВ диапазона ОВЧ целесообразно использование предложенной комбинации синтетического метода с отдельным усилением составляющих сигнала и многоуровневой ШИМ модуляции с оптимизированными порогами квантования напряжения питания.

2. Разработанная уточненная аналитическая методика расчета мощности потерь в ШИМ-модуляторах на GaN транзисторах позволила увеличить точность расчёта КПД по сравнению с методикой предлагаемой производителем элементной базы, в частности, при выходном напряжении  $V_{OUT} = 10$  В (20% от максимального выходного напряжения), отличие КПД составляет 15%, что подтверждено компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями.

3. Разработанная методика оптимизации порогов квантования напряжения питания по критерию минимума потерь мощности для высокоэффективных многоуровневых ШИМ модуляторов, усиливающих сигналы огибающей с Рэлеевским распределением, позволяет снизить среднюю мощность потерь до трех раз при использовании двух значений напряжений питания. При использовании четырех значений напряжений питания, для наиболее распространенных сигналов цифрового радиовещания диапазона ОВЧ (DRM+, RAVIS), средняя мощность потерь снижается в 4,7 раза.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первом** разделе на основании рассмотрения принципов построения перспективных передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ, включающих синтетические методы, предложена оригинальная классификация комбинирования синтетических методов линейного усиления (Рисунок 1).

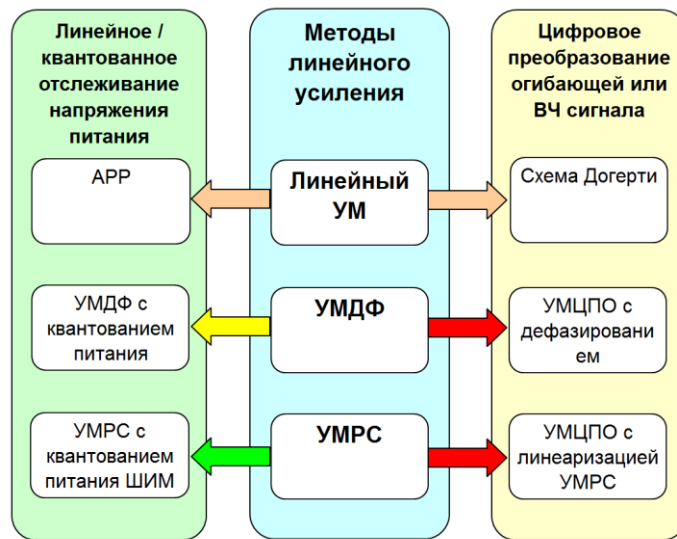


Рисунок 1 - Классификация комбинирования синтетических методов линейного усиления

Показано, что для усиления сигналов с высоким пик-фактором наиболее перспективным является применение УМРС с квантованием напряжения питания  $E_i$  в ШИМ усилителе тракта огибающей (Рисунок 2).

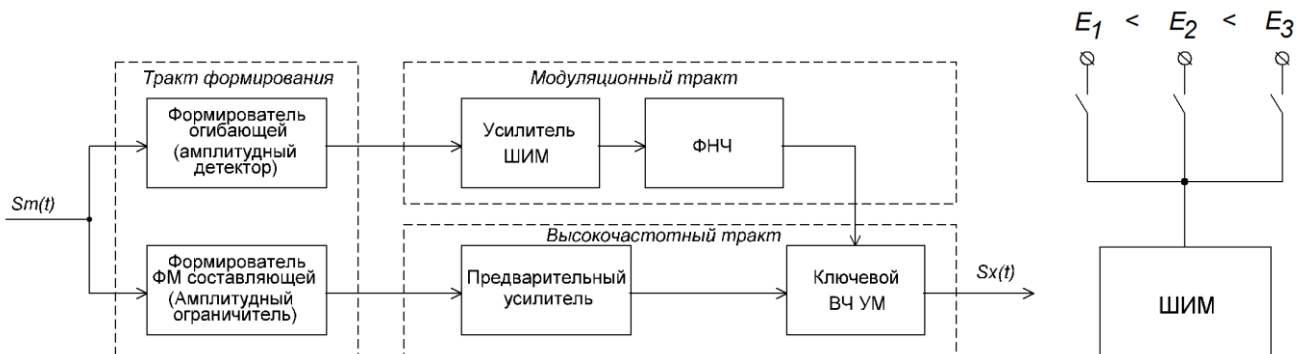


Рисунок 2 - Упрощённая структурная схема ключевого усилителя мощности с разделённым усилением составляющих и реализация модулятора с применением квантования напряжения питания

Проведённый анализ опубликованных исследований в области построения ключевых УМ показал возможность реализации ВЧ тракта УМРС диапазона ОВЧ в классах D / DE с достаточно высоким и близким к предельному КПД (80-90%). Таким образом дальнейшее повышение энергетической эффективности УМРС возможно путём совершенствования модуляционного тракта.

Появление в коммерческой доступности GaN НЕМТ транзисторов, отличающихся от MOSFET в 5...10 раз меньшими выходными емкостями при сопоставимом сопротивлении насыщения, и не имеющих паразитного диода подложки, позволяет приступить к реализации ШИМ усилителя модуляционного тракта УМРС для ЦРВ диапазона ОВЧ с мегагерцовыми тактовыми частотами и высоким средним КПД при усилении огибающей OFDM сигнала.

Проведённое рассмотрение способов построения ШИМ-модуляторов показало перспективность использования GaN FET транзисторов и квантования напряжения питания, что позволило сформулировать направления исследований работы.

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 потери на перезаряд емкостей транзистора (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). Устройство LMG5200 представляет собой драйвер и двухтактный выходной каскад, построенный на транзисторах EPC2016C, изготовленных по технологии НЕМТ.

На основании разработанной уточнённой методики получены аналитические выражения для расчёта потерь мощности  $P_{Loss\Sigma}$  в ШИМ модуляторе на GaN FET транзисторах EPC2016C, применённых в выходном каскаде ИМС LMG5200B, для произвольного напряжения питания:

$$P_{Loss\Sigma} = 2 \cdot f_{sw} \cdot 10^{-12} \cdot (-0,001 \cdot V_{IN}^3 + 0,2129 \cdot V_{IN}^2 - 15,102 \cdot V_{IN} + 550,1) \cdot V_{IN}^2 +$$

$$+ P_{gdr} + Q_{rr} \cdot V_{IN} \cdot f_{sw} + \frac{U_L^2 \cdot r}{R_L^2} + V_{IN}^2 U_L f_{sw} \cdot 10^{-9} / (R_L \cdot 25) \quad , \quad (1)$$

где  $f_{sw}$  – тактовая частота ШИМ сигнала,  $V_{IN}$  – напряжение питания,  $P_{gdr}$  – мощность тепловых потерь в драйвере затвора,  $Q_{rr}$  – заряд обратного восстановления,  $U_L$  – напряжение на нагрузке,  $R_L$  – сопротивление нагрузки модулятора.

Проведённое имитационное компьютерное моделирование работы интегральной микросхемы LMG5200B в качестве ШИМ модулятора в программе Micro-Cap (Рисунок 3) показало хорошее совпадение разработанной уточненной методики расчета потерь с результатами моделирования (Рисунок 4).

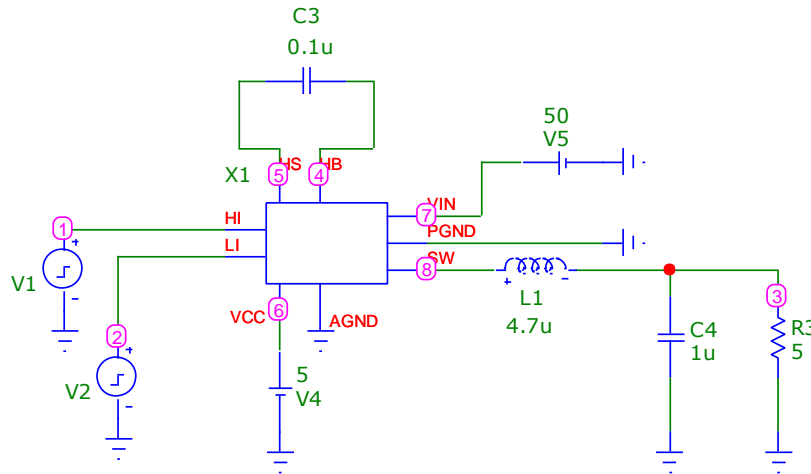


Рисунок 3 – Схема для имитационного моделирования энергетических характеристик интегральной микросхемы LMG5200

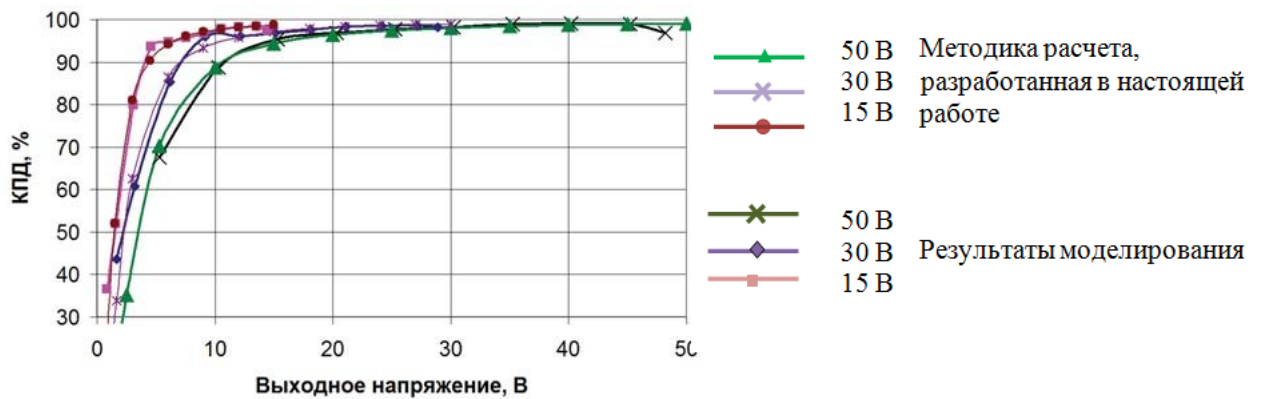


Рисунок 4 – Сравнение результатов расчетов по методике, разработанной в настоящей работе, и результатов моделирования на частоте 1 МГц при напряжении питания 50 В, 30 В, 15 В

В третьем разделе проведена оптимизация порогов квантования многоуровневого ШИМ модулятора на GaN НЕМТ транзисторах по критерию минимума средних потерь для различных значений параметра масштаба  $\sigma$  Релеевского распределения амплитуд огибающей сигнала в диапазоне  $\sigma \in [0,6; 0,8]$ .

Характер зависимостей КПД от выходного напряжения для многоуровневого GaN FET ШИМ модулятора показывает, что средний КПД зависит от статистики распределения амплитуд огибающей усиленного сигнала. Большинство современных телекоммуникационных сигналов, в том числе применяемые в рассматриваемых системах ЦРВ, используют технологию OFDM. Огибающая таких сигналов имеет Релеевское распределение амплитуд:

$$\begin{cases} f(x, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & \text{при } \sigma \geq 0 \\ 0, & \text{при } \sigma < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

Для системы с двумя напряжениями питания суммарные потери  $P_{LOSS\Sigma}$  на обеих ступенях определяются как сумма выражений (3) и (4):

$$P_{LOSS1}(u_1) = \frac{1}{V_{IN}} \int_0^{u_1} \left[ \begin{aligned} & (0,002 \cdot F \cdot (-0,001 \cdot U_1^3 + 0,2129 \cdot U_1^2 - \\ & -15,102 \cdot U_1 + 550,1) \cdot U_1^2 + P + Q \cdot U_1 + \\ & + RxV_{IN} + U_1^2 x V_{IN} F / (R_L \cdot 25)) \frac{4x}{\sigma^2} e^{-\frac{16x^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \right] dx \quad (3)$$

$$P_{LOSS2}(u_1) = \frac{1}{V_{IN}} \int_{u_1}^{u_2} \left[ \begin{aligned} & (0,002 \cdot F \cdot (-0,001 \cdot U_2^3 + 0,2129 \cdot U_2^2 - \\ & -15,102 \cdot U_2 + 550,1) \cdot U_2^2 + P + Q \cdot U_2 + \\ & + RxV_{IN} + U_2^2 x V_{IN} F / (R_L \cdot 25)) \frac{4x}{\sigma^2} e^{-\frac{16x^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \right] dx \quad (4)$$

Учитывая, что аналитическое решение достаточно громоздко, для нахождения решения использовались численные методы.

Оптимизация порогов квантования показала, что основной выигрыш в снижении средней рассеиваемой мощности может быть достигнут при использовании всего двух напряжений питания. Дальнейшее увеличение числа

уровней квантования приводит к меньшему выигрышу, и использование числа напряжений питания более четырех следует признать нецелесообразным ввиду непропорционального достигаемому результату усложнению схемотехнической реализации (Таблица 1).

Графические зависимости относительных значений потерь для различных значений параметра масштаба  $\sigma$  Рэлеевского распределения амплитуд огибающей в диапазоне  $\sigma \in [0,6; 0,8]$  для числа напряжений питания от одного до четырех, соответствующих таблице 1, приведены на рисунке 5.

Абсолютные значения средней мощности потерь для максимального напряжения питания 50 В, сопротивления нагрузки 10 Ом, пиковой мощности 250 Вт приведены в таблице 2. Там же указаны средние значения полезной мощности при различных значениях параметра масштаба  $\sigma$  Рэлеевского распределения амплитуд огибающей.

Таблица 1 – Значения напряжений питания, обеспечивающих минимальную величину средних потерь мощности

Число уровней напряжений питания	Уровень напряжения питания	$\sigma$				
		<b>0.60</b>	<b>0.65</b>	<b>0.70</b>	<b>0.75</b>	<b>0.80</b>
1	1	50	50	50	50	50
2	1	18,0	19,0	20,0	20,5	21,5
	2	50	50	50	50	50
3	1	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
	2	22,0	23,0	23,6	24,6	25,6
	3	50	50	50	50	50
4	1	10	10	10	11	11,5
	2	16,6	16,6	16,6	17,6	18,6
	3	24,5	25,0	25,6	26,5	27,5
	4	50	50	50	50	50

Таблица 2 – Абсолютные значения средней мощности потерь

Число уровней напряжения питания	Мощность потерь, Вт, при $\sigma$ :				
	<b>0,60</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,75</b>	<b>0,80</b>
1	0,538	0,545	0,552	0,559	0,566
2	0,148	0,164	0,181	0,197	0,214
3	0,107	0,120	0,134	0,148	0,163
4	0,093	0,104	0,117	0,130	0,143
Средняя выходная мощность, Вт	5,569	6,536	7,580	8,702	9,901

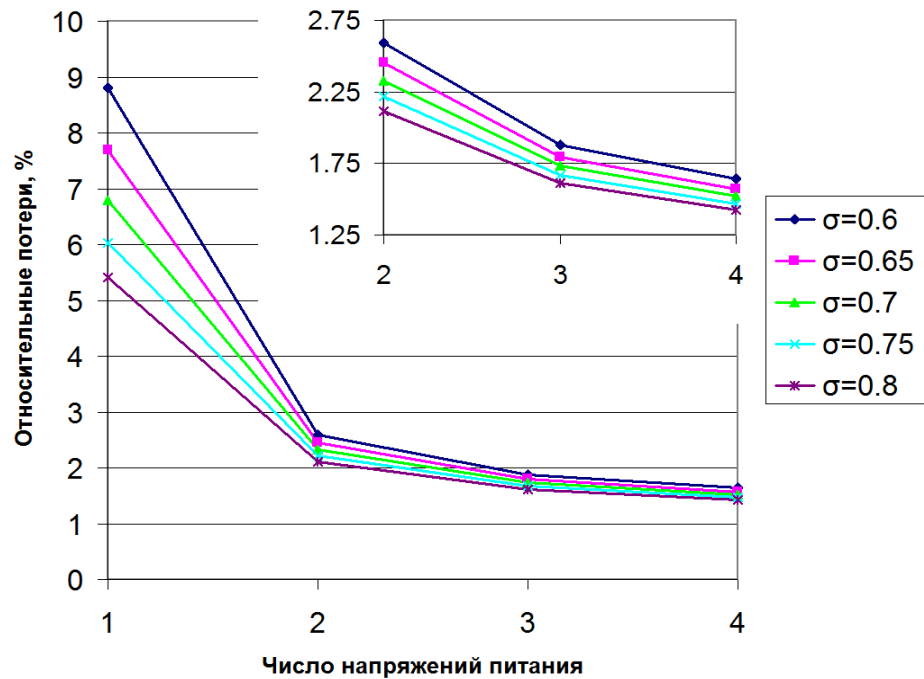


Рисунок 5 – Зависимости относительных значений потерь для различных значений параметра масштаба  $\sigma$  Релеевского распределения амплитуд огибающей от числа уровней квантования напряжения питания

При использовании четырёх напряжений питания, средняя мощность потерь снижается в 3,9...5,5 раз по сравнению с постоянным напряжением питания в зависимости от значения параметра масштаба  $\sigma$  Рэлеевского распределения амплитуд огибающей. Для наиболее распространенных сигналов цифрового радиовещания диапазона ОВЧ (DRM+, RAVIS), характеризующихся значением  $\sigma = 0,7$ , средняя мощность потерь снижается в 4,7 раза.

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 (Рисунок 6) 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.

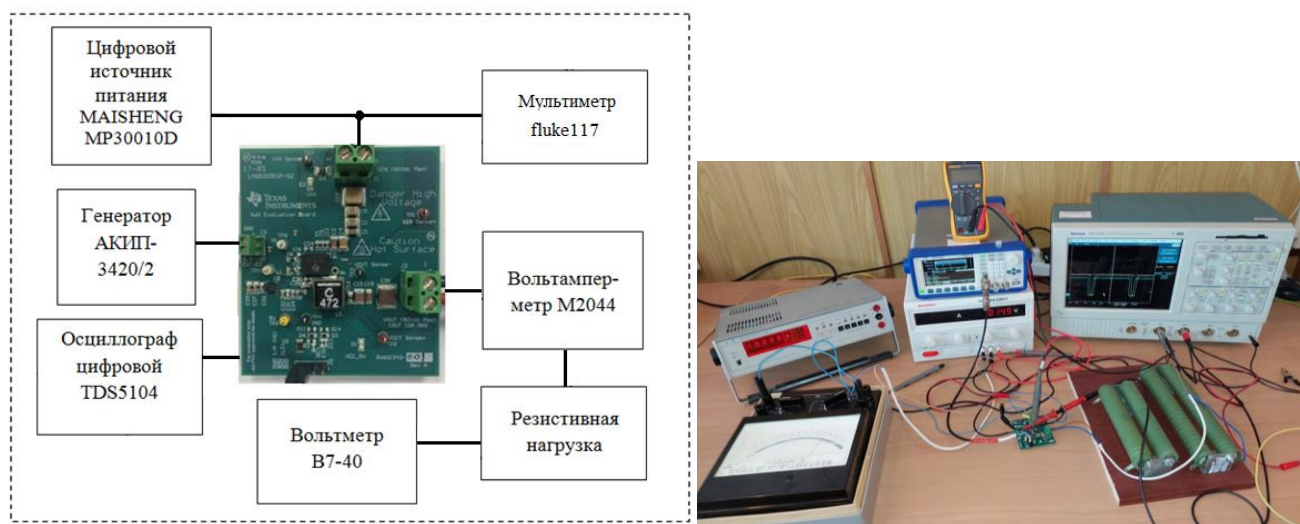


Рисунок 6 – Структурная схема экспериментального макета и его фотография

Методика измерений состоит в установлении тактовой частоты генератора ШИМ, равной 1 МГц, установлении напряжения питания из ряда 15 В, 30 В, 50 В, и изменении длительности импульсов ШИМ для получения выходного напряжения от 10% до 90% с шагом 10% от используемого напряжения питания для каждого значения частоты и напряжения питания. При каждом измерении фиксируется значение потребляемой мощности от всех источников питания и выходной мощности и затем вычисляется значение КПД.

Проведенное экспериментальное исследование ШИМ-модулятора на GaN FET транзисторах с технологией НЕМТ подтвердило целесообразность использования разработанной уточненной методики аналитического расчета потерь мощности, а также результаты имитационного компьютерного моделирования (Рисунок 7).

На рисунке 7 показана основная область уточнения методики расчёта по документации производителя, из которой видно что, например, при выходном напряжении  $V_{OUT} = 10$  В (20% от максимального выходного напряжения), отличие КПД, рассчитанного по методике, предлагаемой производителем элементной базы, от КПД, определённого по разработанной уточненной аналитической методике, составляет 15%. При уменьшении выходного напряжения  $V_{OUT}$  точность расчёта КПД по разработанной методике увеличивается ещё больше.



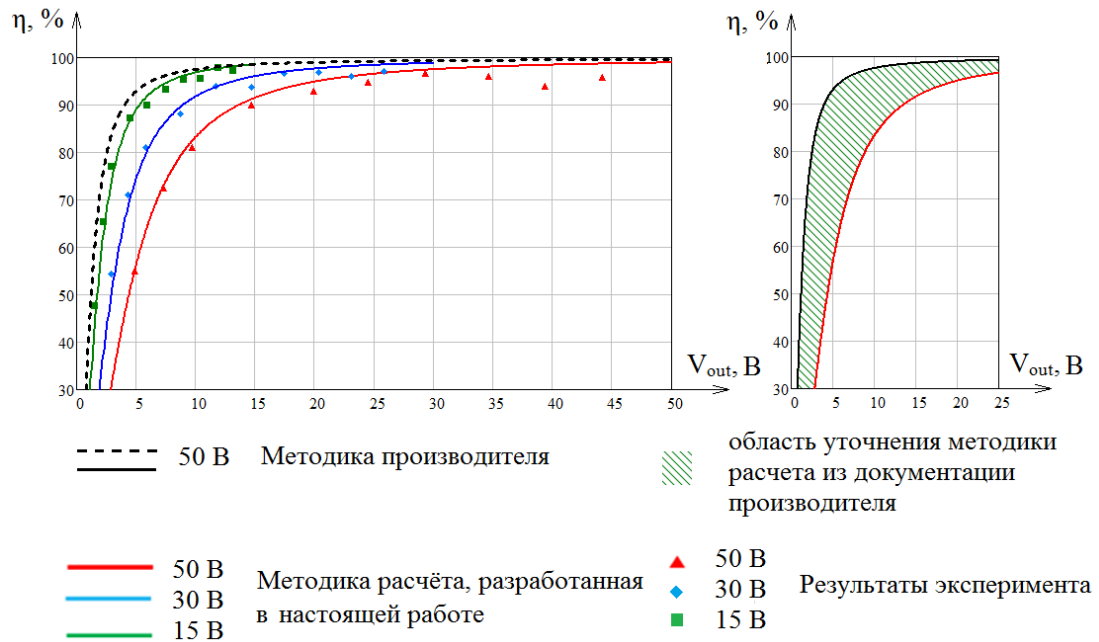


Рисунок 7 – Теоретические графики КПД (сплошные линии, штриховая линия) и результаты измерений (точки) в зависимости от выходного напряжения

Результаты проведенного эксперимента подтвердили разработанную методику оптимизации уровней квантования напряжения питания по критерию минимума средних потерь с целью увеличения КПД ШИМ-модулятора на GaN FET транзисторах с технологией НЕМТ для сигнала с Рэлеевским распределением огибающей, а также подтвердили возможность практической реализации оптимизированного ШИМ-модулятора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, содержащей решение важной научной задачи, имеющей значение для развития теории методов построения и практики проектирования высокоэффективных модуляционных устройств для радиопередатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ с отдельным усилением составляющих.

В процессе выполнения диссертационного исследования успешно решены поставленные задачи и получены следующие основные научные результаты:

1. На основе проведенной классификации комбинирования синтетических

методов линейного усиления показано, что для построения высокоэффективных передатчиков систем ЦРВ диапазона ОВЧ целесообразно использование предложенной комбинации синтетического метода с отдельным усилением составляющих и многоуровневого ШИМ модулятора с оптимизированными порогами квантования напряжения питания.

2. Разработана уточненная аналитическая методика расчета мощности потерь в ШИМ-модуляторах на GaN транзисторах более корректна, чем предлагаемая производителем элементной базы, что подтверждено имитационным компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями при различных напряжениях питания.

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

4. Показано, что основной выигрыш в снижении средней мощности потерь (до трех раз) может быть достигнут при использовании всего двух напряжений питания в ШИМ модуляторе. При использовании четырех значений напряжений питания, для наиболее распространенных сигналов цифрового радиовещания диапазона ОВЧ (DRM+, RAVIS), средняя мощность потерь снижается в 4,7 раза. Использование числа напряжений питания более четырех признано нецелесообразным ввиду непропорционального достигаемому результату усложнению схемотехники.

Таким образом, цель диссертационного исследования достигнута.

К перспективам дальнейшей разработки темы можно отнести использование разработанной уточненной аналитической методики расчета мощности потерь и имитационной компьютерной модели в ключевых приложениях на GaN транзисторах для исследования возможности построения высокоэффективного усилителя мощности диапазона ВЧ с синтетическим методом усиления - дефазированием с непосредственным сложением мощностей канальных усилителей в комбинации с квантованием напряжения питания.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

### Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Варламов, О. В. Комбинирование синтетических методов высокоэффективного высокочастотного усиления / О. В. Варламов, Д. К. Нгуен, С. Е. Грычкин. – DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15, № 9. – С. 11-16.
2. Грычкин С.Е. Методика расчета КПД ШИМ модулятора на GAN FET транзисторах / С. Е. Грычкин, А.М. Захаров, О. В. Варламов. – DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17. № 9. – С. 19-27.
3. Грычкин С.Е. Повышение энергетической эффективности радиопередающей аппаратуры / С.Е. Грычкин. – DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-5-25-31. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17. № 5. – С. 25-31.
4. Грычкин С.Е. Высокоэффективный многоуровневый GaN FET ШИМ модулятор для передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОБЧ / С. Е. Грычкин, О. В. Варламов. – DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-4-12. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18. № 9. – С. 4-11.

### Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

5. Varlamov, O. V. Simultaneous application of several synthetic methods for high efficiency radiofrequency amplification / O. V. Varlamov, D. C. Nguyen, S. E. Grychkin. – DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416126. // В сборнике: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. – 2021. – С. 9416126.
6. Grychkin S.E. Calculation and simulation of GaN FET modulator for envelope elimination and restoration power amplifier / S.E. Grychkin, A.M. Zakharov, O. V. Varlamov. – DOI: 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178469. // В сборнике:

- 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2023. – P. 1-7.
7. Grychkin S. E. Experimental Studies of a Multi-level GaN FET PWM Modulator / S.E. Grychkin, O. V. Varlamov. // В сборнике: 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2024. – P. 1-5.

### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024685533 Российская Федерация. Программа нахождения оптимальных порогов квантования многоуровневого GaN FET ШИМ модулятора: № 2024683748: заявлено 14.10.2024: опубликовано 30.10.2024, / Варламов О.В., Грычкин С. Е; правообладатель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. – 1 с;
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024686729 Российская Федерация. Программа расчета статических энергетических характеристик GaN FET ШИМ модулятора: № 2024683856: заявлено 14.10.2024: опубликовано 12.11.2024, / Варламов О.В., Грычкин С. Е; правообладатель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. – 1 с.