

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента
Родина Михаила Валерьевича на диссертацию *Грычкина Сергея Евгеньевича* на тему «Исследование и разработка высокоэффективных модуляционных устройств передатчиков цифрового радиовещания диапазона ОВЧ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Телекоммуникационная инфраструктура является фундаментом национальной безопасности и успешно работающей экономики страны. Поэтому разработку высокоэффективной радиопередающей техники, во многом определяющей облик телекоммуникационных систем, следует считать важнейшей задачей, стоящей перед радиоспециалистами.

Одним из главных показателей эффективности радиопередающих устройств (РПДУ) является промышленный коэффициент полезного действия (КПД). Чем он выше, тем меньше потери мощности в РПДУ, а значит, экономически выгоднее его эксплуатация. Кроме того, высокий КПД обуславливает улучшение массогабаритных характеристик аппаратуры и надежности за счет уменьшения размеров радиаторов (или вообще их исключения). Также высокий КПД способствует более длительной работе РПДУ в условиях энергетической автономности.

Главным образом промышленный КПД РПДУ определяется КПД усилительного тракта. Как известно, наибольший КПД усилителя мощности достигается в ключевых режимах работы (классы *D*, *E*, *F* и их модификации). Однако непосредственное усиление современных спектрально-эффективных радиосигналов (в настоящее время – преимущественно OFDM-сигналы), имеющих, как правило, высокий пик-фактор, в ключевом режиме работы усилителя невозможно. Поэтому на практике находит применение метод раздельного усиления составляющих радиосигнала (в зарубежной литературе – метод Кана). Он характеризуется использованием модулятора электропитания, представляющего собой, чаще всего, импульсный регулятор напряжения понижающего типа. Однако применение метода раздельного усиления

Вход. № 59/25
« 26 » 05 2025
подпись

составляющих радиосигнала в диапазоне ОВЧ, в котором работают, в частности, системы цифрового радиовещания (ЦРВ), сопряжено с технологическими ограничениями в силу более высоких рабочих частот и большей ширины полосы частот используемых радиосигналов. Последнее в значительной мере ограничивает применение известных модуляторов электропитания, так как при увеличении частоты коммутации их КПД снижается, а значит, снижается промышленный КПД РПДУ.

Поэтому задача снижения мощности потерь в модуляторах электропитания для РПДУ систем ЦРВ диапазона ОВЧ с отдельным усилением составляющих сигнала является **актуальной**, а диссертационная работа Грычкина Сергея Евгеньевича, посвященная решению этой задачи, важной и своевременной.

В качестве предмета своего исследования диссертант избрал перспективное направление развития радиопередающей техники – совершенствование методов повышения энергетической эффективности РПДУ современных систем ЦРВ. В частности, в фокусе исследования – метод отдельного усиления составляющих радиосигнала. Хотя сам принцип усиления известен достаточно давно (с середины прошлого века), но он имеет существенные ограничения даже на современном уровне развития техники. На мой взгляд, диссертанту удалось, сочетая оригинальные технические решения и математические модели потерь в модуляционном тракте, модифицировать метод усиления составляющих радиосигнала, который обеспечивает повышение промышленного КПД РПДУ.

Заслуживает внимания и разработанная диссертантом методика оптимизации порогов квантования входного напряжения модулятора электропитания по критерию минимума потерь мощности.

В ходе проведения диссертационного исследования автором получены новые научные положения, обладающие теоретической и практической значимостью и выдвигаемые на защиту, а именно:

- показано что для построения энергетически эффективного РПДУ системы ЦРВ диапазона ОВЧ целесообразно использование при реализации метода отдельного усиления составляющих радиосигнала ШИМ модулятора с оптимизированными пороговыми значениями квантования входного напряжения;

- разработанная уточненная аналитическая методика расчета мощности потерь в ШИМ модуляторах на нитрид-галлиевых транзисторах позволила

увеличить точность расчета КПД по сравнению с методикой, предлагаемой производителем элементной базы;

- разработанная методика оптимизации порогов квантования входного напряжения ШИМ модулятора по критерию минимума потерь мощности позволяет снизить среднюю мощность потерь до трех раз при использовании двух значений входных напряжений модулятора для наиболее распространенных сигналов системы ЦРВ диапазона ОВЧ (стандарты DRM+, RAVIS).

В диссертации получен ряд **новых научных результатов**, основными из которых, на мой взгляд, являются:

- показано, что для построения высокоэффективных РПДУ систем ЦРВ диапазона ОВЧ целесообразно использование метода раздельного усиления составляющих радиосигнала с квантованием напряжения на входе модулятора электропитания, обеспечивающего существенное снижение мощности потерь в модуляторе;

- разработана уточненная аналитическая методика оценки мощности потерь в модуляторе электропитания, учитывающая дополнительные факторы потерь мощности;

- разработана методика оптимизации порогов квантования напряжения на входе модулятора электропитания по критерию минимума потерь мощности при использовании метода раздельного усиления составляющих радиосигнала с огибающей, имеющей Рэлеевское распределение;

- показано, что основной выигрыш в снижении средней мощности потерь (до 3 раз) может быть достигнут при использовании всего двух уровней квантования входного напряжения модулятора электропитания. При использовании четырех уровней квантования средняя мощность потерь снижается более чем в 4 раза.

Несомненным достоинством диссертации является проведенная автором оптимизация порогов квантования для модулятора электропитания. Существенное значение для практики имеют полученные автором выводы о требуемом числе порогов квантования в РПДУ, работающих с OFDM-сигналами.

Проведенный соискателем обзор известных трудов в области построения РПДУ, в основе которых используются ключевые усилители мощности

и синтетические методы усиления радиосигналов отечественных и зарубежных авторов (что подтверждается соответствующими ссылками в тексте диссертации), предложенная и примененная классификация комбинирования синтетических методов линейного усиления, проведенный анализ и совершенствование аналитической методики расчета мощности потерь в ШИМ модуляторах на нитрид галлиевых транзисторах, разработанная методика оптимизации порогов квантования входного напряжения модулятора по критерию минимума потерь, результаты имитационного моделирования и эксперимента позволяют считать **обоснованными научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации.**

Теоретическая значимость работы заключается в разработанных методике расчета мощности потерь и методике оптимизации порогов квантования напряжения на входе модулятора электропитания на нитрид галлиевых транзисторах по критерию минимума потерь мощности для РПДУ систем ЦРВ диапазона ОВЧ.

Практическая значимость заключается в обосновании возможности повышения КПД и снижения мощности потерь посредством использования метода раздельного усиления составляющих радиосигнала с ШИМ модулятором с оптимизированными порогами квантования входного напряжения, разработки методики проектирования подобных устройств.

Представленные в работе результаты диссертационного исследования являются **достоверными**, что обусловлено корректностью постановки частных задач исследования, аргументированностью и доказательностью предложенной уточненной аналитической методики расчета мощности потерь, корректностью применения математического аппарата и согласованностью результатов, полученных с помощью аналитических расчетов, имитационного компьютерного моделирования и экспериментального исследования.

Перечень результатов, полученных в диссертации, дает основание утверждать, что работа Грычкина Сергея Евгеньевича вносит существенный вклад в совершенствование радиопередающей техники телекоммуникационных систем, в том числе систем ЦРВ.

На мой взгляд, основные положения, результаты и выводы диссертации могут найти применение в научно-исследовательских институтах

и на предприятиях промышленности, занятых разработкой радиопередающей техники для современных телекоммуникационных систем, а также систем цифровой широкополосной передачи данных с береговых станций на суда (NAVDAT).

Необходимо отметить и **недостатки** диссертации и автореферата, приведу некоторые из них:

1. Наименование ШИМ модулятора «многоуровневым» в данном исследовании представляется несколько некорректным. В теории модуляционных источников электропитания под многоуровневыми понимают источники, у которых напряжение на выходе может принимать несколько дискретных значений. В исследовании же диссертанта дискретные уровни напряжения имеют место на входе источника. Полагаю, на это надо было указать в диссертации, а лучше – предложить новую терминологию. Также необходимо отметить, что диссертант в тексте диссертации один и тот же модулятор называют то «многоуровневым», то «с квантованием напряжения» – необходимо все-таки определиться с единообразием терминологии.

2. В п. 2 научной новизны работы (стр. 8 диссертации) диссертант указывает на разработку методики, но не сообщает, что это, собственно за методика. Полагаю, что имелась в виду методика расчета потерь мощности.

3. На стр. 69, 72, 76 диссертации явно не хватает иллюстративного материала в виде схем (эквивалентная схема драйвера, эквивалентная схема транзистора), которые диссертант описывает лишь словами. Это значительно затрудняет осмысление текста.

4. На стр. 73 диссертации корректнее указать на среднее значение тока, протекающего через дроссель. Ведь ток через дроссель не просто постоянный, а пульсирующий, то есть имеющий постоянную и переменную составляющие. Там же диссертант не указал на обязательное условие верности формулы (2.3) – она верна только тогда, когда ток через дроссель не прерывается (без учета потерь энергии в схеме). В дальнейшем, к сожалению, диссертант это условие не проверил ни при моделировании, ни в результате экспериментальной отработки модулятора.

5. Из полученной диссертантом формулы (2.12) на стр. 76 диссертации следует, что мощность потерь зависит и от сопротивления открытого канала сток-

исток транзистора, которое, в свою очередь, зависит от температуры транзистора. Однако диссертантом не исследуется, к сожалению, на сколько важна эта зависимость при расчете потерь мощности. Аналогично можно сказать и про зависимость мощности потерь от сопротивления нагрузки модулятора, в качестве которой выступает стоковая цепь усилителя мощности.

6. В схеме имитационной модели модулятора почему-то не учитываются потери в проводах, дросселе и конденсаторе. Полагаю, раз диссертантом исследуются потери в модуляторе, их нужно было учесть (тем более что результаты имитационного моделирования сравниваются с результатами экспериментальной отработки). Либо следовало уточнить, почему они опущены. Также следует отметить, что диссертантом не показано, почему индуктивность дросселя составляет 4,7 мкГн. Полагаю, такую индуктивность имеет дроссель выходного фильтра модулятора на тестовой плате с микросхемой LMG5200. Однако наличие неизменного по индуктивности дросселя в общем ограничивает использование данной тестовой платы, так как от этого значения индуктивности зависит характер протекания тока через дроссель, а значит, так необходимая линейность регулировочной характеристики модулятора.

7. В диссертации не пояснено, что такое $Q_{гг}$ и γ на стр. 73, R_{rad} – на стр. 101. В тексте диссертации (стр. 18) при первом упоминании не расшифрована аббревиатура «КУМ». Формулы в тексте диссертации и автореферата, а также список использованных источников часто оформлены с нарушением требований ГОСТ 7.0.11. На стр. 8 диссертации имеются ошибки форматирования текста. В тексте диссертации и автореферата часто отсутствуют требуемые знаки пунктуации. В формуле (2.5) диссертации не хватает одной скобки. На рис. 4.6 диссертации неверно указано включение генератора в схему стенда.

Отмеченные замечания, на мой взгляд, не носят принципиального характера и не оказывают существенного влияния на общую оценку диссертации и полученных в ней научных и практических результатов.

Структура диссертации отвечает задачам исследований. Диссертация оформлена преимущественно в соответствии с ГОСТ 7.0.11, характеризуется логичностью изложения материала, включает представительный перечень использованных источников из 75 наименований, однако не всегда содержит уместные и информативные иллюстрации.

Основные выводы и результаты диссертации докладывались на авторитетных научно-технических конференциях и опубликованы в 7 научных трудах, среди которых 4 работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки РФ (по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения), 3 работы проиндексированы в ведущих международных базах данных Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Таким образом, требование об опубликовании полученных результатов в рецензируемых научных изданиях выполнено.

Автореферат диссертации соответствует требованиям по форме и содержанию. Его содержание полностью соответствует основным положениям и выводам, изложенным в диссертации.

Тема и содержание диссертации соответствуют п.п. 1 и 4 паспорта научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

ВЫВОДЫ

1. Диссертация Грычкина Сергея Евгеньевича, несмотря на отмеченные недостатки, является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком научном уровне и содержащей решение актуальной научной задачи обоснования возможности повышения КПД и снижения мощности потерь в РПДУ ОВЧ диапазона посредством использования метода раздельного усиления составляющих радиосигнала с оптимизированными порогами квантования входного напряжения модулятора электропитания, имеющей важное значение для радиопромышленности страны.

2. По актуальности избранной темы, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверности и новизне, а также значимости полученных результатов, диссертация полностью удовлетворяет критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в актуальной версии), 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.

В соответствии с п. 28 «Положения о присуждении ученых степеней» сообщаю о себе следующие данные. Согласен на включение указанных персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата технических наук Грычкина Сергея Евгеньевича и их дальнейшую обработку.

ФИО составителя отзыва,

e-mail, телефон:

Наименование организации:

Родин Михаил Валерьевич,

mvrodin@bmstu.ru, (499) 263-65-68

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (научно-исследовательский университет)»

Почтовый адрес организации:

105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1

Сайт организации:

<https://bmstu.ru>

Телефон организации:

(499) 263-63-91

E-mail организации:

bauman@bmstu.ru

Доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук, доцент

Михаил Валерьевич Родин

«23» мая 2025 г.

Подпись кандидата технических наук, доцента Михаила Валерьевича Родина заверяю.

