



Леонтьев Евгений Владимирович

**Синтез и реализация усилителей мощности класса G с высоким КПД для
OFDM-сигналов**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Коротков Александр Станиславович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Соловьева Елена Борисовна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой теоретических основ электротехники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электро-технический университет»

Шушпанов Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Ведущая организация:

АО «Светлана – Электронприбор»

Защита состоится «25» ноября 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У 2.2.13.31 на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПБПУ) по адресу: 195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д.29, второй учебный корпус, аудитория 347.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Направлять отзывы по адресу: 195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д. 29.

Автореферат разослан «___» октября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.2.13.31
доктор технических наук, профессор



А.С. Коротков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Развитие беспроводных инфокоммуникационных систем привело к широкому применению CDMA-, OFDM- и иных методов модуляции, в которых передаваемый сигнал имеет высокий пик-фактор. Улучшение характеристик усилителей мощности (УМ), обеспечивающих высокий КПД усилителя при средней мощности сигнала с высоким пик-фактором, является актуальной задачей научного исследования.

При разработке УМ в первую очередь следует определить архитектуру усилителя. Схемы УМ такие, как Доэрти, LINC (linear amplifier on nonlinear components) и балансная схема с модуляцией нагрузки, основаны на методе модуляции нагрузки. Данные схемы усилителей уступают по ширине рабочей полосы частот усилителям мощности, основанным на модуляции напряжения питания (envelope tracking power amplifiers, ETPAs) из-за сложности проектирования выходной согласующей цепи.

ЕТРА имеет в своей структуре усилитель огибающей (УО). КПД усилителя огибающей вносит вклад в КПД всей архитектуры. На данный момент большое количество научных статей посвящено методике синтеза ЕТРА и УО, выполненных в интегральном исполнении на КМОП-технологии. Из-за малой рассеиваемой мощности в интегральной схеме основной УМ возможно построить, например, по каскадной схеме или на основе переключаемых конденсаторов, что позволяет реализовать усилитель с требуемыми характеристиками. При реализации ЕТРА с выходной средней мощностью несколько десятков Вт разработчик столкнется с отсутствием формализованных методик построения УМ. Для данной задачи необходимо построить основной УМ по схеме с общим истоком с собственным элементом теплоотвода, а также обеспечить высокий КПД усилителя огибающей вследствие более высоких требований к рассеиваемой мощности УО.

Частным случаем ЕТРА является УМ класса G, в котором УО коммутирует напряжение питания между дискретными уровнями. КПД УО в УМ класса G более высокий, чем в ЕТРА, так как он работает в импульсном режиме. Таким образом, развитие методики структурно-параметрического синтеза УМ класса G – актуальная задача при разработке УМ, работающего в широком диапазоне рабочих частот и излучающего сигнал от нескольких десятков до сотен Вт.

На данный момент возникает необходимость в развитии методики параметрического синтеза УМ класса G, которая бы однозначно определяла основные параметры УО в УМ класса G: количество переключаемых уровней и их значение, значение пороговых напряжений компараторов. В ряде опубликованных на данный момент работ при усилении OFDM-сигнала используется разное количество (2, 3, 4 или 8) уровней напряжения питания, поэтому в диссертации рассматривается методика параметрического синтеза УМ класса G, позволяющая обосновать определенное количество уровней и другие параметры УО в УМ класса G. Методика параметрического синтеза будет применена для OFDM-сигналов с целью достижения максимального КПД усилителя мощности при средней мощности излучаемого сигнала.

В УМ класса G при изменении напряжения питания изменяется коэффициент усиления и фазовый сдвиг, что отражается на высоких нелинейных искажениях выходного сигнала. Развитие методики линеаризации УМ класса G должно являться неотъемлемой частью синтеза усилителя мощности класса G. На данный момент к УМ класса G в научных работах применяется методика цифровых предискажений (digital pre-distortion, DPD). Проведенный обзор систем предискажений показал недостаток в виде увеличения в 5 раз тактовой частоты DPD-блока по сравнению с тактовой частотой цифрового блока, формирующего сигнал. По мнению диссертанта, для УМ класса G может быть успешно применена аналоговая система предискажений на основе нелинейных компонентов, например, диодов, которая позволит получить высокую скорость адаптации малого числа коэффициентов и возможность работы с широкополосными сигналами при низком энергопотреблении. Таким образом, развитие методики структурно-параметрического синтеза аналоговой системы предискажений для УМ класса G является актуальной задачей научного исследования.

На основе выше сказанного определены объект и предмет исследования, сформированы цель и задачи научной работы:

Объектом исследования является усилитель мощности класса G.

Предметом исследования являются следующие параметры усилителя: количество уровней

напряжения питания, значение уровней напряжения питания, значение порогов компаратора усилителя огибающей в усилителе мощности класса G.

Целью работы является разработка методики параметрического синтеза усилителя мощности класса G с высоким КПД при усилении OFDM-сигнала.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику анализа КПД усилителя мощности класса G;
2. Развить методику оптимального параметрического синтеза усилителя мощности класса G при усилении OFDM-сигнала;
3. Развить методику структурно-параметрического синтеза системы предскажений для данного класса усилителей мощности;
4. Синтезировать широкополосный усилитель мощности класса G с системой предскажений для перспективных частотных диапазонов сотовой связи и провести экспериментальные исследования усилителя мощности.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовался аппарат теории вероятности, теории сигнальных графов, функционального анализа. Имитационное моделирование выполнено с использованием системы автоматизированного проектирования Microwave Office и среды LabVIEW. Экспериментальные исследования выполнены при использовании анализатора спектра и векторного анализатора.

Научная новизна результатов диссертационной работы.

1. Предложена методика анализа КПД для усилителя мощности класса G и УМ с отслеживанием огибающей на основе данных PDF-зависимости излучаемого сигнала, которая применена для анализа КПД в УМ класса G при усилении OFDM-сигнала.
2. Приведен алгоритм параметрического синтеза УМ класса G, позволяющий разработать УМ класса G с высоким КПД при усилении сигнала с определенной PDF-зависимостью.
3. Впервые произведена оценка КПД УМ класса G со схемой коррекции коэффициента усиления и фазового сдвига и определены оптимальные параметры УО для достижения максимального КПД в УМ класса G со схемой коррекции при усилении OFDM-сигнала.

Практическая значимость научных результатов.

1. Применение предложенного метода анализа КПД и алгоритма синтеза УМ класса G позволяет определить оптимальные параметры УО для достижения максимального КПД при излучении сигнала с определенной PDF-зависимостью.
2. Полученные в работе параметры УО (количество уровней напряжений питания и их значение, величина опорных напряжений компараторов) усилителя мощности класса G при усилении OFDM-сигнала позволяют синтезировать УМ класса G с максимальным КПД при средней мощности сигнала с PDF-зависимостью для OFDM-сигнала.
4. Результаты моделирования УМ класса G со схемой коррекции позволяют определить необходимую структуру системы предскажений, исходя из требований к линейности, эффективности и стоимости передающего модуля.
5. На основе предложенной методики изготовлен УМ класса G работающий в диапазоне частот 700-1000 МГц и имеющий КПД при средней мощности сигнала 32,5%.

Положения, выносимые на защиту.

1. КПД усилителя мощности класса G рассчитывается, исходя из функции распределения мощности выходного сигнала при знании зависимости КПД от выходной мощности при каждом коммутируемом напряжении питания.
2. Расчет КПД усилителя мощности с отслеживанием огибающей является частным случаем расчета КПД УМ класса G при числе коммутируемых уровней напряжения питания равных количеству точек PDF-зависимости.
3. Существуют оптимальные параметры усилителя огибающей в УМ класса G, а именно количество (значение) коммутируемых уровней напряжения питания и значения опорных напряжений компараторов, при которых достигается максимальный КПД усилителя мощности со средней мощностью выходного сигнала: при 5-ти уровнях коммутации напряжения питания УМ

класса G обеспечивает КПД, близкий к КПД усилителя мощности с отслеживанием огибающей для OFDM-сигнала.

4. Коррекции модуля и фазы коэффициента усиления при изменении напряжения питания достаточно как метода линеаризации УМ класса G в случае малой (0,2-1,0 дБ) компрессии коэффициента усиления основного УМ, причем результаты имитационного моделирования показали, что УМ класса G со схемой коррекции имеет КПД = 22%, в то время как УМ при максимальном напряжении питания – 8,5%, при одинаковом значении ACPR выходного сигнала.

5. В УМ класса G со схемой коррекции коэффициента усиления и фазового сдвига при коммутации напряжений питания выбор параметров усилителя огибающей определяет компромисс между максимальным КПД и значением уровня нелинейных искажений в выходном сигнале, причем результаты имитационного моделирования показали, что выбор параметров УО в УМ класса G с схемой коррекции позволяет получить КПД = 22% при ACPR выходного сигнала равном – 46 дБн, либо КПД = 40,5% при ACPR = – 32,5 дБн.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность результатов работы и обоснованность научных выводов подтверждается соответствием представленных аналитических расчетов экспериментальным данным. Основные положения работы обсуждены на следующих конференциях:

- Международная конференция «Международный форум «Микроэлектроника 2016», 2016;
- Международная конференция «Международный форум «Микроэлектроника 2018», 2018;
- Конференция «Школа молодых ученых «Микроэлектроника-2021» Российский форум Микроэлектроника 2021;
- Всероссийская конференция “Неделя науки ИЭиТ”, 2022.

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертационного исследования опубликовано 10 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Все представленные результаты и основные научные положения, теоретические выводы, расчеты и данные измерений получены лично автором.

Пути дальнейшей реализации. Научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения исследований, в дальнейшем могут быть использованы при разработке усилителей мощности с повышенным КПД при средней мощности сигнала, охватывающих несколько диапазонов сотовой связи 4-го (4G) и 5-го (5G) поколения и работающих в диапазонах частот 600 – 1000 МГц (4G, 5G), 1800 – 2700 МГц (4G, 5G) или 3300 – 4900 МГц (5G).

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ и цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы вместе с приложениями составляет 130 страниц, в том числе 112 страниц основного текста, 81 рисунок, 17 таблиц, список используемой литературы из 77 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы. В **первой главе** рассмотрены основные схемотехнические архитектуры усилителей мощности, основанных на модуляции нагрузки или модуляции напряжения питания.

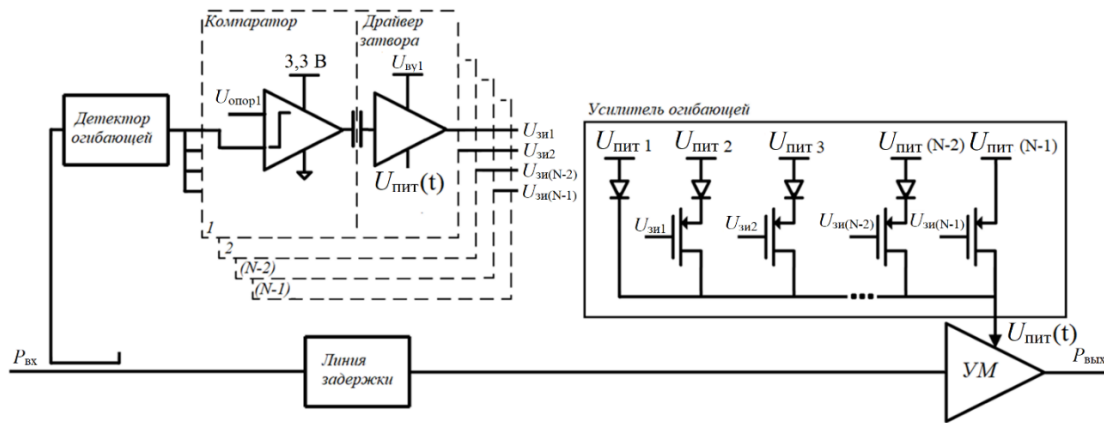


Рисунок 1 – Схема УМ класса G

Отмечено, что на данный момент в научных источниках отсутствует методика определения оптимальных параметров УО в УМ класса G для достижения максимального КПД при средней мощности передаваемого сигнала. **Вторая глава** решает задачу расчета КПД усилителя мощности класса G. Показано, что применение функции вероятности (probability density function, PDF) является более эффективным для данной задачи, чем широко используемая дополненная интегральная функция распределения мощности сигнала (complementary cumulative distribution function, CCDF).

Из PDF-зависимости выходного сигнала возможно определить среднюю мощность P_{cp} на участке от аргумента N_1 до N_2 , при которой УМ класса G имеет постоянное напряжение питания, как

$$P_{cp}(\text{дБм}) = \frac{10 \lg \sum_{i=N_1}^{N_2} 0,001 \text{ Вт} \cdot 10^{\frac{P_{\text{мгн макс}}(\text{дБм}) + P_{\text{ОВО } i}(\text{дБ})}{10}} p_i(P_{\text{ОВО}})}{\sum_{i=N_1}^{N_2} p_i(P_{\text{ОВО}})} \cdot \frac{1}{0,001 \text{ Вт}}. \quad (1)$$

Интегральная вероятность нахождения усилителя мощности при том или ином напряжении питания будет равна интегральной вероятности PDF-зависимости в заданном участке.

Интегральная вероятность нахождения усилителя мощности при определенном напряжении питания является косвенным параметром, значение которого зависит от порогового напряжения компараторов (Рис. 1), поэтому в работе представлена методика преобразования значения вероятности обнаружения УМ класса G при том или ином напряжении питания (участок PDF-зависимости с данной вероятностью) в опорное напряжение компараторов.

Далее приведена методика расчета КПД усилителя мощности класса G с двумя уровнями коммутации напряжения питания при усилении OFDM-сигнала. PDF-зависимость OFDM-сигнала взята на примере стандарта LTE с тестовой конфигурацией E-TM 3.1 и была разбита на дискретное количество уровней (Рис. 2).

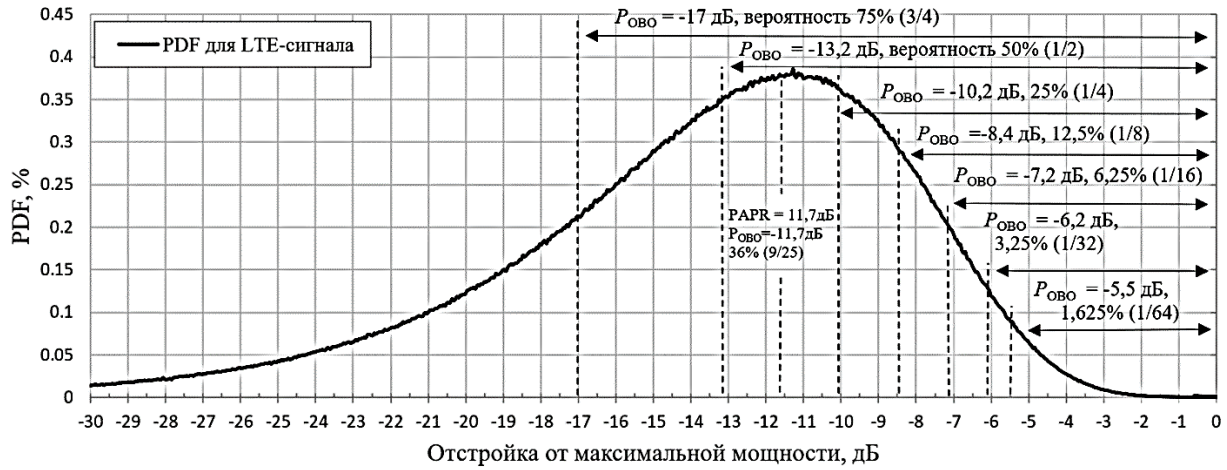


Рисунок 2 – PDF-зависимость LTE-сигнала

Расчет КПД был произведен для случая, когда УМ класса G имеет интегральную вероятность нахождения основного усилителя при напряжении $U_{пит1}$ равную 1/2, и при $U_{пит2}$ также 1/2. Полученная зависимость обобщена для УМ с N-уровнями коммутации напряжения питания:

$$\text{КПД} = 100\% \sum_{n=1}^N p(U_{пит n}) \frac{P_{ср n}(\text{Вт})}{U_{пит n} I_{пит n}(P_{ср n})}, \quad (2)$$

где $p(U_{пит n})$ – вероятности нахождения УМ класса G при напряжении питания $U_{пит n}$, $P_{ср n}$ – средняя мощность при $U_{пит n}$, $I_{пит n}(P_{ср n})$ – потребляемый ток при средней мощности $P_{ср n}$.

Оптимизация параметров N , $U_{пит n}$, и $p(U_{пит n})$ имеет цель в достижении максимального КПД при средней мощности выходного сигнала, при котором пиковая мощность равна максимальной мощности УМ. После синтеза основного УМ и определения его максимальной мощности возможно произвести измерения КПД усилителя при найденных напряжениях питания. Проводились измерения УМ на основе LDMOS-транзистора с максимальной выходной мощностью 50 Вт. Первоначально при нахождении оптимальных значений напряжений питания сделано предположение о том, что транзистор в УМ представляет идеальный ИТУН в области измеренной зависимости КПД от выходной мощности при определенном напряжении питания. Используя данное упрощение, возможно рассчитать $I_{пит n}(P_{ср n})$ при напряжении питания, находящемся в области измеренного.

Результаты расчета УМ с двумя уровнями коммутации напряжения питания показали, что максимальный КПД усилителя 39,1% достигается при $p(U_{пит1})=7/8$ и $p(U_{пит2})=1/8$. Далее аналогичный расчет был произведен при увеличении количества уровней напряжения питания с использованием среды LabVIEW.

Для определения максимального КПД, который может быть достигнут в УМ класса G был рассмотрен случай, когда число уровней N равно количеству точек в применяемой PDF-зависимости ($N=1000$). Данная конфигурация соответствует ЕТРА с полным повторением амплитуды огибающей по напряжению питания. Тогда формула расчета КПД примет следующий вид:

$$\text{КПД} = \sum_{n=1}^{N=1000} PDF(P_{ОВОn}) \frac{10^{\frac{P_{\text{макс}} + P_{ОВОn}}{10}}}{U_{пит n}(P_{\text{макс}} + P_{ОВОn}) I_{U_{\text{дискр}}}(P_{\text{макс}} + P_{ОВОn})}, \quad (3)$$

где $P_{\text{макс}}$ – максимальная мощность при максимальном напряжении питания, выраженная в дБм, $I_{U_{\text{дискр}}}$ – измеренная зависимость тока стока для дискретного напряжения питания, $U_{пит n}$ – значение напряжения питания, при котором достигается максимальная мощность, равная $(P_{\text{макс}}(U_{пит \text{ макс}}) + P_{ОВОn})$. Из полученных результатов расчета сделан вывод, что существует оптимальный диапазон изменения напряжения питания в ЕТРА (6,5 – 28,0 В), при котором достигается максимальный КПД. Модуляция напряжения питания для мгновенной мощности намного ниже средней мощности приводит к уменьшению КПД.

Приведенные результаты позволяют сравнить УМ класса G с ЕТРА, коммутирующем напряжение питания в том же диапазоне напряжения питания, что и УМ класса G. Выводы второй главы диссертации показывают результат сравнения двух расчетов (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение УМ класса G и ЕТРА

УМ класса G			УМ с отслеживанием огибающей,	
Количество уровней $U_{\text{пит}}, N$	Значение $U_{\text{пит}}, \text{В}$	КПД при $P_{\text{ср}}, \%$	Диапазон $U_{\text{пит}}, \text{В}$	КПД при $P_{\text{ср}}, \%$
1	28	17,6	-	-
2	10,6; 28	39,1	10,6 – 28	40,3
3	7,5; 10,6; 28	41,7	7,5 – 28	41,4
4	6,5-28	43,8	6,5 – 28	44,5
5	6,5-28	44,7	6,5 – 28	44,5
7	6,5-28	45	6,5 – 28	44,5

Из приведенного сравнения выявлено, что при $N = 7$ КПД УМ класса G превышает КПД ЕТРА, что является некорректным результатом. Данная проблема связана с упрощением в расчете КПД УМ класса G. Отклонение КПД при данном упрощении можно уменьшить, увеличив число измерений КПД при различных напряжениях питания.

Тем не менее при 5-ти уровнях напряжения питания и выше КПД УМ класса G близок к КПД усилителя с отслеживанием огибающей, что говорит о нецелесообразности проектирования УМ класса G с $N > 5$ с целью увеличения КПД при усилении OFDM-сигнала.

Далее в главе 2 уделено внимание методике синтеза выходной согласующей схемы основного УМ, которая в усилителях мощности с модуляцией напряжения питания должна согласовывать транзистор на оптимальное сопротивление. Результаты моделирования показали существование импеданса нагрузки для получения максимального КПД при средней мощности ($Z_{\text{опт}}^{\text{КПД}}$) или $P_{\text{вых макс}}$ ($Z_{\text{опт}}^{P_{\text{вых}}}$).

В заключении главы предложен алгоритм синтеза УМ класса G для достижения максимального КПД при средней мощности сигнала с определенной PDF-зависимостью:

Алгоритм синтеза УМ класса G состоит из следующих шагов:

1. Определить максимальную выходную мощность $P_{\text{вых макс}}$ УМ при $Z_{\text{н}} = Z_{\text{опт}}^{P_{\text{вых}}}$ в заданном рабочем диапазоне частот. Построить зависимость $P_{\text{макс}}$ и КПД от $U_{\text{пит}}$.
2. Построить функцию PDF для передаваемого сигнала. Из полученной зависимости определить среднюю мощность и PAPR сигнала.
3. Из зависимости $P_{\text{макс}}(U_{\text{пит}})$ определить $U_{\text{пит ср}}$, при котором $P_{\text{макс}}(U_{\text{пит ср}}) = P_{\text{вых ср}}(U_{\text{пит макс}})$.
4. Согласно методике построения контуров на диаграмме Смита определить оптимальный импеданс $Z_{\text{н}}$, при котором достигается компромисс в увеличении КПД при $U_{\text{пит ср}}$ и максимальной мощности при $U_{\text{пит макс}}$.
5. Далее необходимо построить зависимости $P_{\text{макс}}$ и КПД от $U_{\text{пит}}$ для УМ, синтезируемого в п.4.

6. Определить интегральные вероятности при дискретных значения $P_{\text{ОВО } n}$ из выбранной в п.2 функции PDF. Из графика $P_{\text{макс}}(U_{\text{пит}})$ в п.5 определить $U_{\text{пит } n}$, при которых достигается $P_{\text{макс}}(U_{\text{пит } n}) = P_{\text{макс}}(U_{\text{пит макс}}) + P_{\text{ОВО } n}$.

7. Используя формулу 2.3, рассчитать КПД УМ класса G при различной интегральной вероятности нахождения УМ при $U_{\text{пит } n}$. Определить интегральную вероятность (порог переключения компаратора) и $U_{\text{пит } n}$ при максимальном рассчитанном КПД УМ класса G.

8. Из результатов расчета КПД УМ класса G при различном количестве уровней напряжения питания, аналогично таблице 2 для OFDM-сигнала, найти оптимальное количество переключаемых уровней $U_{\text{пит}}$ с точки зрения необходимого КПД, габаритных размеров модуля или, например, стоимости.

Третья глава диссертации посвящена развитию методики линеаризации УМ класса G. Рассмотрены паразитные эффекты при коммутации напряжения питания и способы их учета при разработке системы предискажений. Так, для учета случайных задержек, которые сместят по

времени переход напряжения питания на другой уровень, целесообразно синхронизовать систему предискажений и основной УМ, используя один выходной сигнал УО $U_{\text{пит}}(t)$ (рисунок 3).

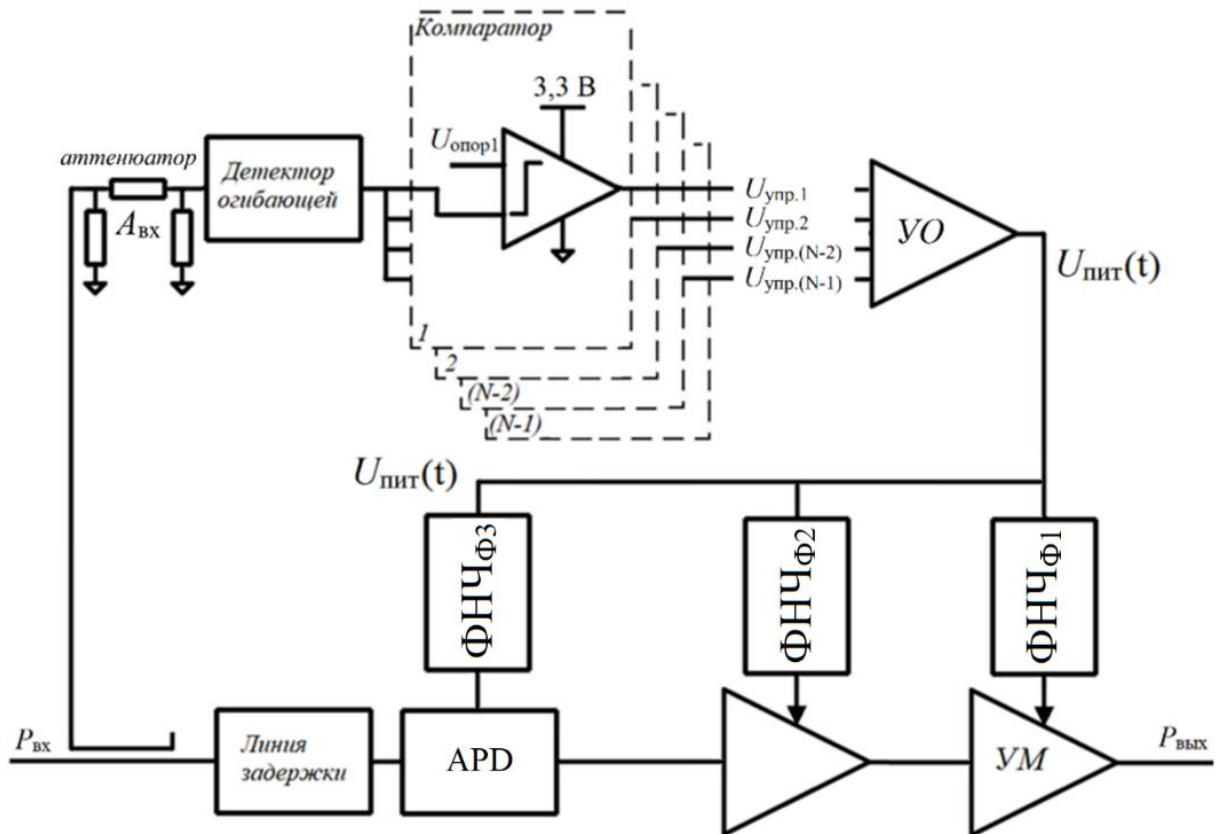


Рисунок 3 – Структура УМ класса G с APD-системой

На рисунке 3 показаны фильтры нижних частот, подавляющие переходные процессы или случайные всплески напряжения питания в основном УМ. Различная задержка фильтров Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 синхронизирует отклик блоков в радиочастотном тракте. Для предложенной блок-схемы целесообразно разделить систему предискажений на два блока:

- схема коррекции коэффициента усиления и фазового сдвига при коммутации напряжения питания;
- схема компенсации нелинейной зависимости коэффициента усиления и фазового сдвига в области компрессии коэффициента усиления при каждом уровне напряжения питания.

В работе изложены основы структурного синтеза схемы коррекции системы предискажений для УМ класса G. Предложено несколько схем для решения данной задачи:

1. Схема на основе PIN-диодных коммутаторов (рисунки 4, 5), которые переключают модуль ($A_{1,2,3}$) и фазу ($\Phi_{1,2,3}$) коэффициента передачи в зависимости от $U_{\text{пит}}(t)$.

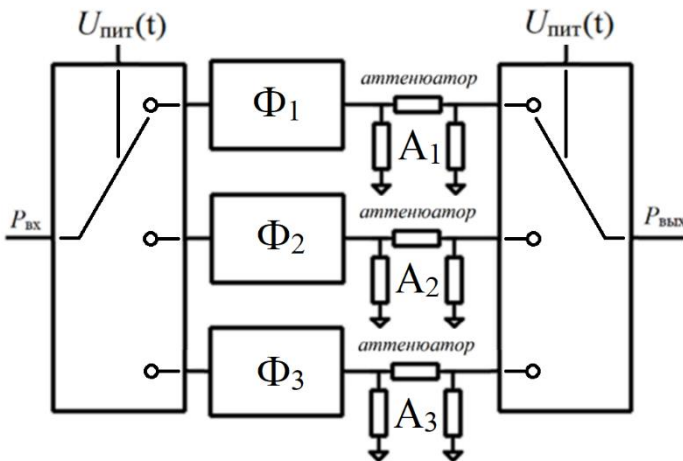


Рисунок 4 – Схема коррекции на основе PIN-диодных коммутаторов

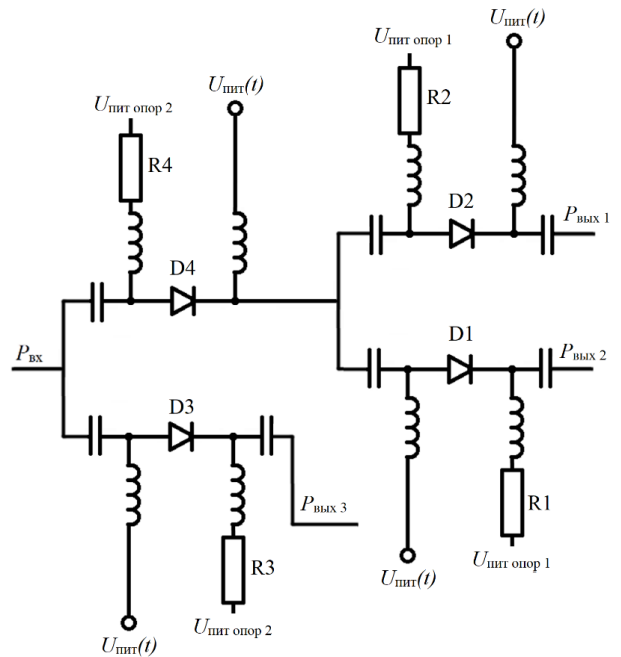


Рисунок 5 – Схема PIN-диодного коммутатора

2. Схема на основе симметричных усилителей, показанная на рисунке 6.

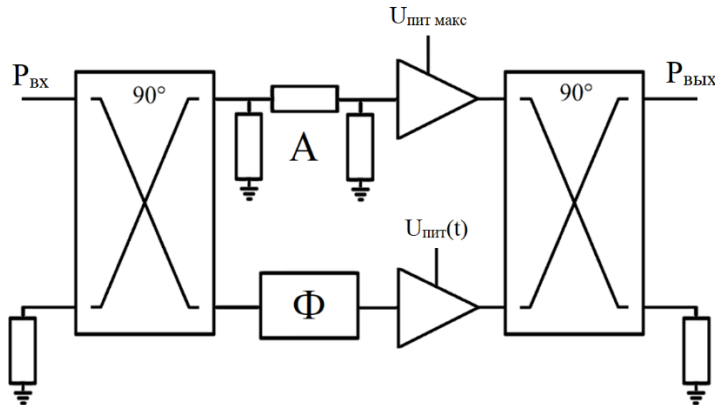


Рисунок 6 – Схема коррекции на основе симметричных усилителей

Было предположено, что использование двух симметричных усилителей при изменении напряжения питания одного из них по закону $U_{\text{пит}}(t)$ воспроизведет инверсное нелинейное поведение УМ. Однако после применения метода построения передаточной функции цепи на основе сигнально-ориентированного графа были сделаны выводы, что симметричные усилители в данной схеме не могут иметь идентичную схему включения, как у основного УМ. К примеру, если транзистор в основном УМ синтезирован по схеме с общим истоком, то симметричные УМ должны иметь иную схему включения транзистора, а именно такую, чтобы зависимость коэффициента усиления симметричных усилителей от напряжения питания $K_y(U_{\text{пит}}(t))$ и фазового сдвига $\varphi_y(U_{\text{пит}}(t))$ соотносились бы с зависимостью коэффициента усиления УМ от напряжения питания $K_{\text{УМ}}(U_{\text{пит}}(t))$ и $\varphi_{\text{УМ}}(U_{\text{пит}}(t))$ следующим образом:

$$K_y(U_{\text{пит}}(t))e^{-i\varphi_y(U_{\text{пит}}(t))} = 2K_y(U_{\text{пит макс}})e^{-i(\varphi_y(U_{\text{пит макс}}) + \Phi)} - \frac{1}{K'_{\text{УМ}}(U_{\text{пит}}(t))e^{i\varphi_{\text{УМ}}(U_{\text{пит}}(t))}}, \quad (4)$$

где $K'_{\text{УМ}}(U_{\text{пит}}(t)) = K_{\text{УМ}}(U_{\text{пит}}(t))/K_{\text{УМ}}(U_{\text{пит мин}})$.

3. Схема на основе аналоговых элементов (рисунок 7) является третьей из предложенных схем.

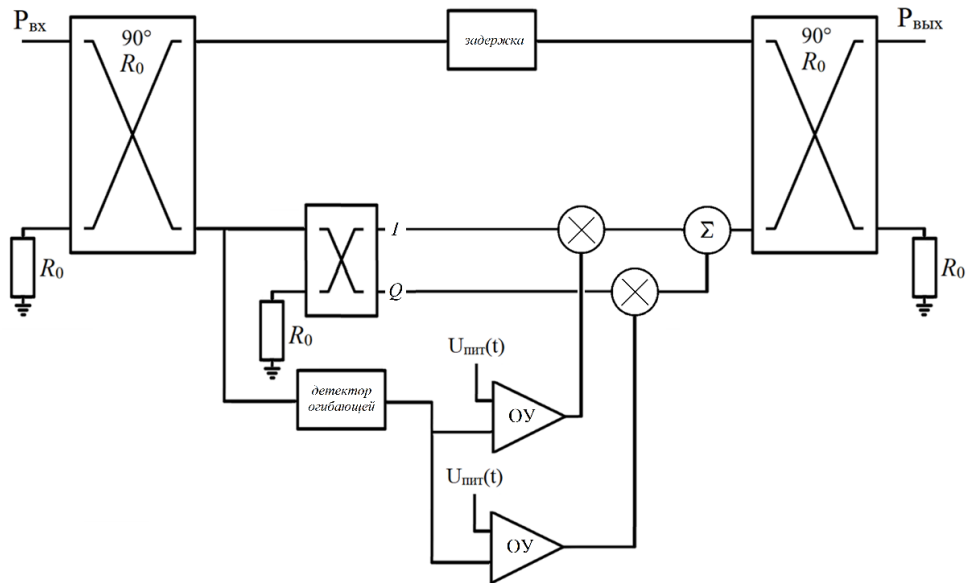


Рисунок 7 – Схема коррекции

Данная схема подразумевает ее синтез на операционных усилителях (ОУ), которая имела бы противоположную зависимость от $U_{\text{пит}}(t)$, нежели зависимость УМ.

Четвёртая глава посвящена вопросам разработки имитационной модели и анализу результатов экспериментальных исследований. Разработана нелинейная модель УМ класса G с использованием программной платформы VSS AWR на основе переключаемых нелинейных моделей. В данной модели УМ класса G применена схема коррекции коэффициента усиления и фазового сдвига на основе идеальных коммутаторов (схема на рисунке 4). Цель исследования заключалась в определении оптимальных параметров УО в УМ класса G с тремя уровнями коммутации напряжения питания, а также параметров схемы коррекции $A_{1, 2, 3}$ и $\Phi_{1, 2, 3}$, при которых достигается максимальный КПД при сохранении нелинейных искажений в выходном сигнале на одном уровне с нелинейными искажениями, которые обеспечивает УМ без коммутации напряжения питания. Были построены зависимости конверсии типа «АМ-АМ» и «АМ-ФМ» при различных конфигурациях УО и схемы коррекции, обеспечивающих конверсию коэффициента усиления при различных напряжениях питания на 0,2, 0,5, 1 и 2 дБ. На рисунке 8 показаны зависимости конверсии типа «АМ-АМ» и «АМ-ФМ» при различных напряжениях компараторов УО. Значения напряжений питания УМ класса G и параметры схемы коррекции настроены так, чтобы компрессия коэффициента усиления при каждом напряжении питания была равна 0,5 дБ.

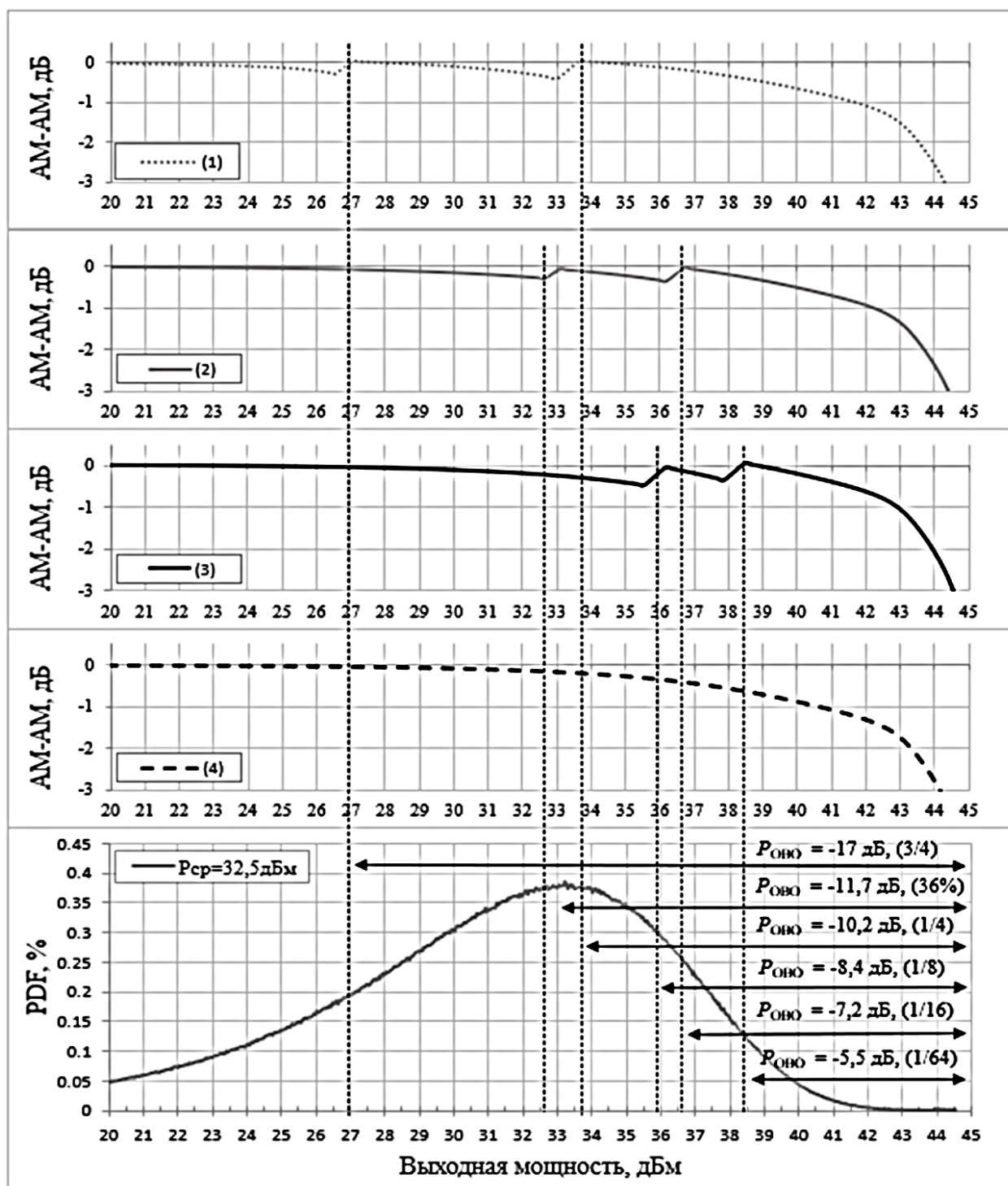


Рисунок 8 – Зависимость «АМ-АМ» при различных конфигурациях УО

В соответствии с методикой расчета КПД для УМ класса G был определен КПД при средней мощности 32,5 дБм для модели основного УМ с максимальной выходной мощностью 44,2 дБм. Определено, что для конфигурации (1) (рисунок 8) УМ класса G будет иметь при средней мощности 32,5 дБм КПД 20,4%, а АСРР выходного сигнала будет равен -41,5 дБн, для конфигурации (2) КПД УМ класса G равен 14,8% при АСРР = -47,3 дБн, для конфигурации (3) КПД = 13,2% при АСРР = -45,5 дБн и для (4) КПД = 13,2% при АСРР = -46,5 дБн. Из данных результатов следует, что конфигурация УО (2) имеет максимальный КПД = 14,8 % при низком уровне АСРР = -47,3 дБн. Далее был произведен подобный расчет для конфигураций УО и схемы коррекции, обеспечивающий переменную компрессию коэффициента усиления при различном напряжении питания от 0,2 до 1 дБ.

Из полученных результатов был сделан следующий вывод: оптимальное значение между линейностью УМ класса G (АСРР выходного сигнала) и его КПД при средней мощности

достигается при переменной компрессии коэффициента усиления при различных напряжениях питания. С помощью программной среды LabVIEW были рассчитаны параметры УО и схемы коррекции для УМ класса G с пятью коммутируемыми уровнями напряжения питания, которые показали, что максимальный КПД 22% при $ACPR = -46$ дБн достигается при следующих зависимостях конверсии типа «АМ-АМ» и «АМ-ФМ» (рисунки 9 и 10).



Рисунок 9 – Зависимость типа «АМ-АМ»

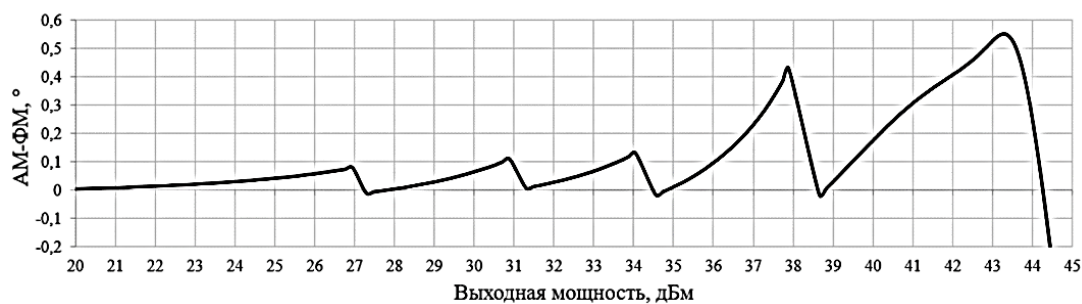


Рисунок 10 – Зависимость типа «АМ-ФМ»

На рисунках 11 и 12 показаны спектры выходного сигнала при средней мощности 32,5 дБм для трёхуровневого УМ класса G с девиацией 0,5 дБ и для пятиуровневого УМ класса G с переменной девиацией коэффициента усиления соответственно.

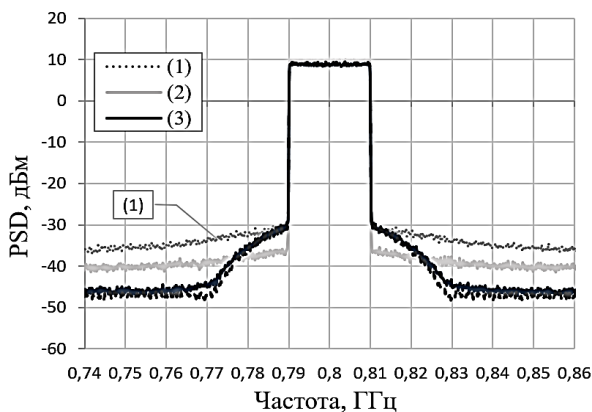


Рисунок 11 – Спектр УМ класса G, $N = 3$, девиация $K_y = 0,5$ дБ

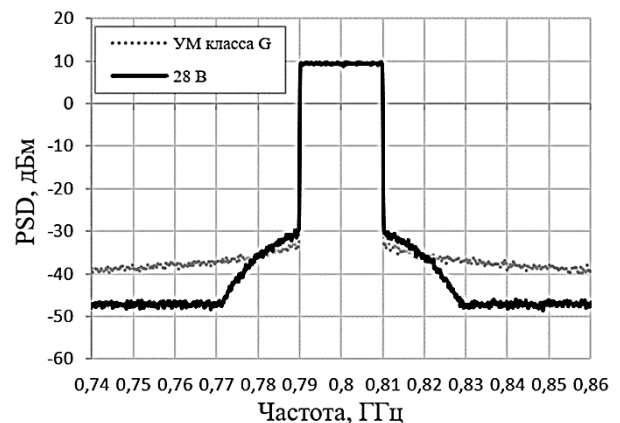


Рисунок 12 – Спектр УМ класса G, $N = 5$, переменная девиация K_y

Для анализа результатов и выводов четвертой главы результаты моделирования были обобщены в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение КПД и ACPR для УМ класса G

Конфигурация	КПД, %	ACPR ₁ , дБн	ACPR ₂ , дБн
УМ с постоянным напряжением питания 28 В	8,5	-46,5	-56,8
Трёхуровневый УМ класса G с девиацией 0,2 дБ	12,3	-46,5	-53
Трёхуровневый УМ класса G с девиацией 0,5 дБ	14,8	-47,3	-49,7
Трёхуровневый УМ класса G с девиацией 2 дБ	30	-32,5	-36
Пятиуровневый УМ класса G с переменной девиацией	22	-46	-47
Пятиуровневый УМ класса G с девиацией 2 дБ	37	-24	-29

Приведенные в таблице 2 результаты моделирования УМ класса G и расчет КПД показали, как снижается линейность УМ (параметр АСРР) и при этом увеличивается КПД. Усилитель с пятью уровнями коммутации напряжения питания имеет значение $АСРР_1$ близкое к УМ с постоянным напряжением питания 28 В, а его КПД возрастет с 8,5 до 22%. Дальнейшее увеличение КПД усилителя мощности возможно только при уменьшении параметра АСРР выходного сигнала, а его дальнейшее уменьшение требует применения метода предискажений, корректирующего нелинейное поведение УМ при девиации коэффициента усиления.

Результаты анализа (таблица 2) и рисунки 11, 12, также показывают, что нелинейные искажения УМ класса G ухудшают $АСРР_2$ и АСРР в последующих каналах. Это говорит о том, что проектирование системы цифровых предискажений для данного класса УМ потребует увеличения более чем в 5 раз тактовой частоты DPD, что отразится на увеличении потребляемой мощности и стоимости модуля, поэтому синтез APD-системы для УМ класса G позволит разработать систему предискажений с более низкой потребляемой мощностью. Также применение только схемы коррекции, как частного случая APD-системы, увеличит КПД согласно моделированию с 8,5 до 22%. Данное применение актуально для задач, где потребляемая мощность системы предискажений критична, например, для активной фазированной решетки системы сотовой связи с малым покрытием соты пятого поколения, в которой должно использоваться несколько систем линеаризации усилителей мощности. Дальнейшее увеличение КПД с 22% до 37%, сохранив показатель АСРР, возможно только при синтезе полной APD-системы с упрощенным рядом Вольтерра или нелинейными элементами, описывающими поведение основного УМ вблизи компрессии K_y при каждом напряжении питания.

Далее в работе приведен расчет КПД усилителя класса G согласно PDF-зависимости сигнала с искажениями. Показано, как изменяется PDF-зависимость при компрессии коэффициента усиления и изменения K_y при коммутации напряжения питания. На рисунке 13 приведена PDF-зависимость для УМ-класса G с параметрами УО, обеспечивающими девиацию коэффициента усиления 0,2 дБ при наличии схемы коррекции коэффициента усиления и фазового сдвига.

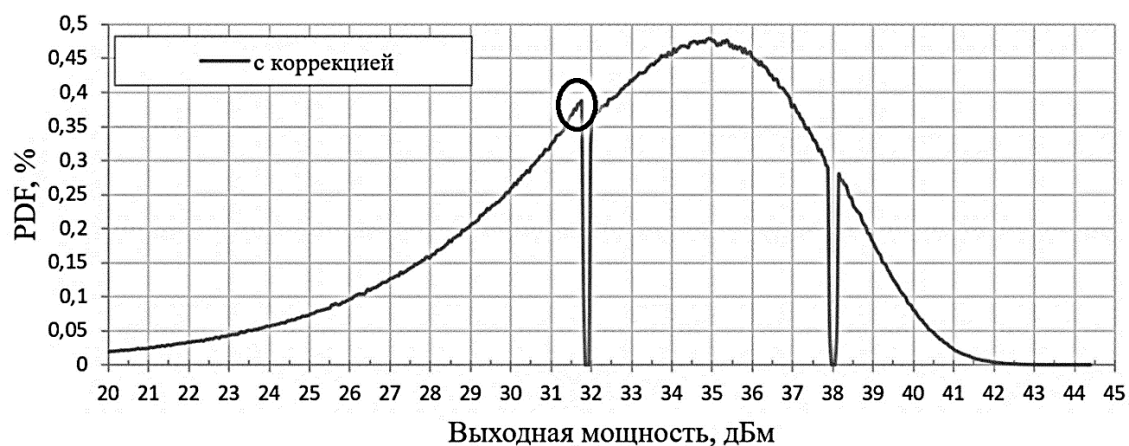


Рисунок 13 – PDF-зависимость выходного сигнала УМ класса G со схемой коррекции

На рисунке 13 выделена область искажений PDF-зависимости вызванных компрессией K_y при каждом напряжении питания.

Далее разработан прототип УМ класса G с тремя уровнями коммутации напряжения питания (рисунок 15). Количество уровней коммутации напряжения питания, равное 3, не является оптимальным при усилении OFDM-сигнала и было выбрано для достижения малой индуктивной составляющей в выходной цепи УО при трассировке печатной платы для уменьшения переходных процессов в шине $U_{пит.}$ (рисунок 14).

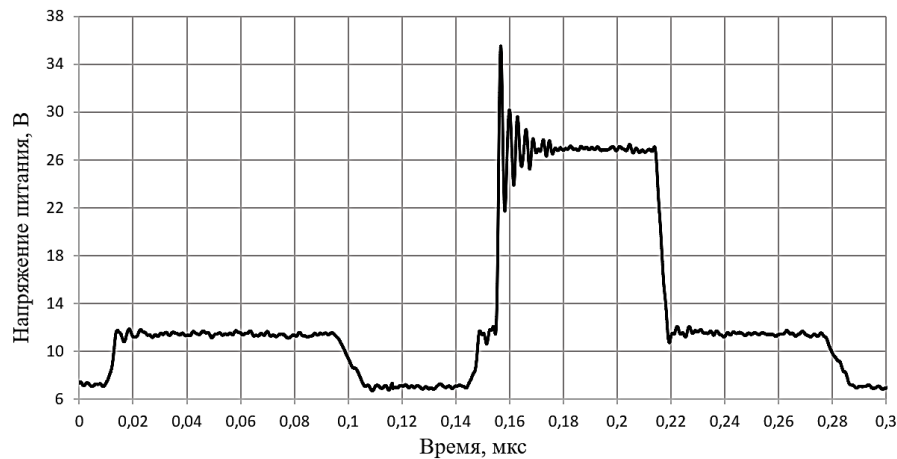


Рисунок 14 – Осциллограмма напряжения питания

Количество уровней и частотные характеристики УО могут быть увеличены для сигналов с полосой частот $BW > 100$ МГц при разработке интегральной схемы УО и использовании бескорпусных GaN-транзисторов при коммутации напряжения.

СВЧ-тракт прототипа имеет два каскада предварительных усилителей. Потребляемая мощность предварительных усилителей равна 5,88 Вт и не учитывается в расчете КПД УМ. Составляющие элементы схемы включают: линия задержки (DL246A), детектор огибающей ADL5511, компараторы LTC6752, GaN-транзисторы EPC8009. GaN-транзисторы в схеме усилителя огибающей были выбраны, исходя из возможности пропускания максимального тока 2 А при минимальной входной емкости транзистора 45 пФ. В схеме УО используются диоды PMEG10020 и PMEG6010. Основной УМ разработан на основе LDMOS-транзистора BLP15M9S30 и согласован в диапазоне частот 700 – 1000 МГц.

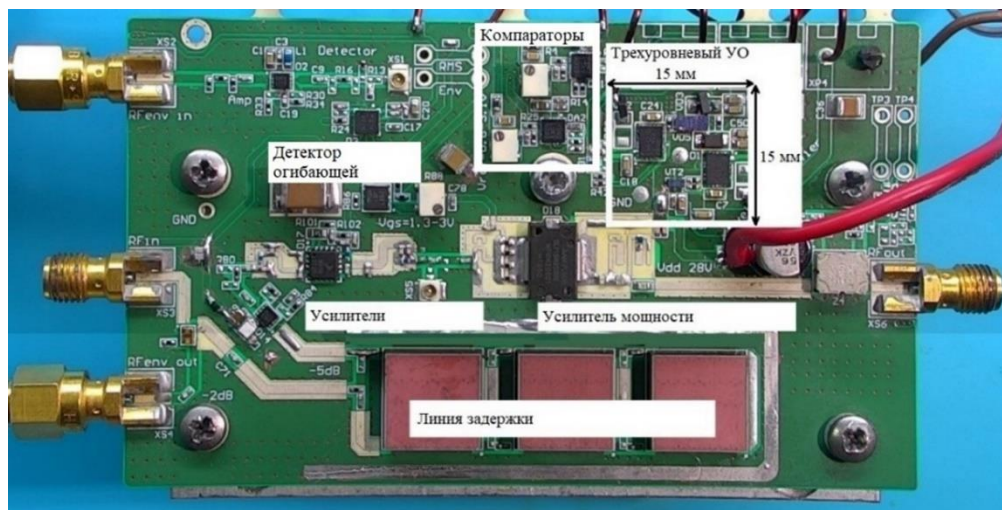
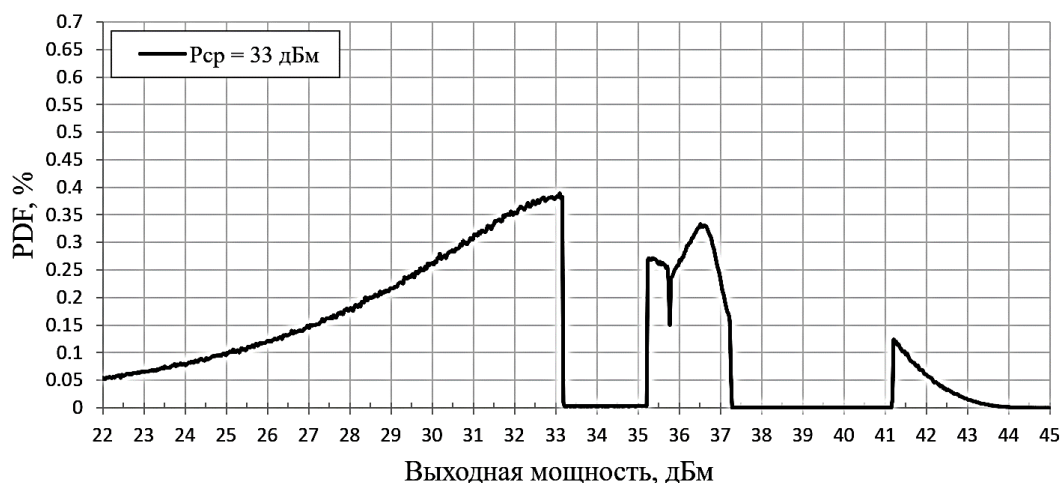


Рисунок 15 – Прототип УМ класса G

На основе измеренных зависимостей прототипа типа «АМ-АМ» и «АМ-ФМ» была разработана модель и построены PDF-зависимости при разной средней мощности выходного сигнала. На рисунке 16 показан пример данных измерений.

Рисунок 16 – PDF-зависимость при $P_{\text{ср}} = 33$ дБм

Согласно методике расчета КПД для УМ класса G, изложенной в главе 1, получены оптимальные параметры УМ ($U_{\text{пит1}} = 7,3$ В, $U_{\text{пит2}} = 11,8$ В, $U_{\text{пит3}} = 28$ В). Исходя из полученных PDF-зависимостей и измеренной зависимости КПД от выходной мощности при трех напряжениях питания, было рассчитано КПД усилителя мощности класса G. На рисунке 17 проиллюстрированы результаты расчета КПД и результаты измерения КПД прототипа при усилении LTE-сигнала с $BW = 20$ МГц.

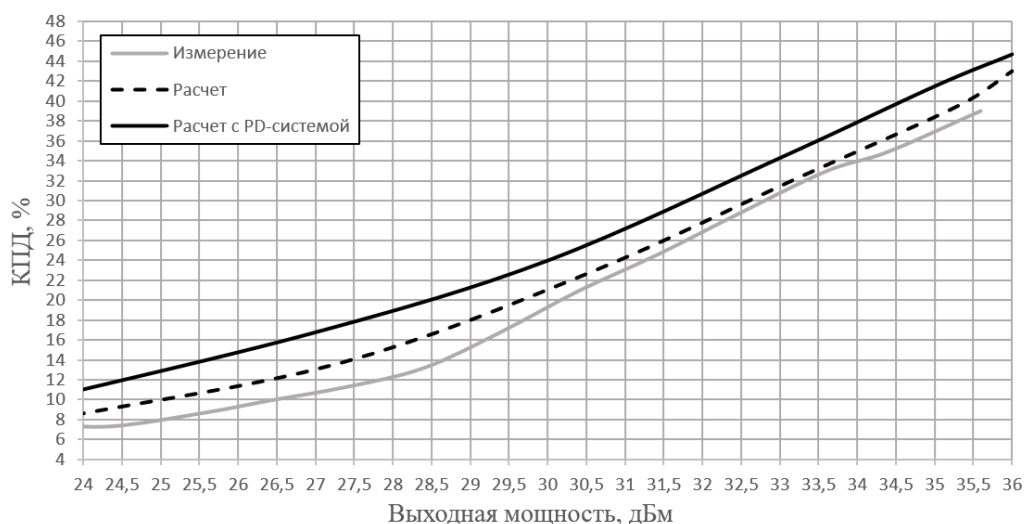


Рисунок 17 – Измерение УМ класса G

Из соотношения теоретических и экспериментальных данных (ошибка измерения не превышает 1%) следует, что КПД усилителя огибающей близок к 100% при коммутации напряжения питания. При низкой мощности КПД прототипа меньше, чем рассчитанный, так как в данном случае в цепи преобладает только напряжение 7,3 В и весь потребляемый ток течет через диод PMEG10020, на котором падение напряжения составляет 0,77 В.

К модели УМ класса G была применена PD-система на основе LUT (look-up-table), полностью восстанавливающая форму PDF-зависимости выходного сигнала (рисунок 16). Так как PD-система изменяет среднюю мощность выходного сигнала при каждом напряжении питания, это приводит к увеличению КПД усилителя мощности класса G. На рисунке 17 показана зависимость КПД усилителя класса G при применении системы предсказаний. Расчет КПД усилителя класса G с PD-системой показал увеличение КПД на 3% относительно КПД УМ класса G без системы линейаризации. Согласно результатам эксперимента и расчетным значениям для LTE сигнала с $BW=20$ МГц КПД усилителя огибающей равен 97% при средней мощности выходного сигнала 33 дБм. При усилении двух LTE-сигналов с $BW=2 \times 20$ МГц КПД усилителя огибающей уменьшится до 94%.

Заключение

Усилитель мощности класса G является решением, в котором может быть достигнут высокий КПД при средней мощности сигнала в широком диапазоне рабочих частот. Благодаря высокому КПД усилителя огибающей, данное решение позволяет получить высокие характеристики передатчика.

Разработан прототип трехуровневого УМ класса G в котором детектор огибающей, компараторы и УО выполнены на сосредоточенных компонентах с суммарной задержкой 18 нс. Для синхронизации выходного сигнала основного УМ с огибающей напряжения питания следует использовать дополнительные компоненты, задерживающие РЧ-сигнал, (например, DL246A), которые увеличивают габаритные размеры модуля. Поэтому актуальна разработка интегральной схемы, включающей детектор огибающей, компараторы и часть УО с минимальным временем отклика.

Реализация APD-системы в интегральном исполнении или проектирование нескольких интегральных схем в одном корпусе для данного класса УМ позволит разработать радиочастотный приемо-передающий модуль с малыми массогабаритными показателями и низким потреблением мощности системы предсказаний.

В заключении проводится сравнение характеристик прототипа с другими современными решениями. Так, разработана тестовая плата для инверсного несимметричного УМ по схеме Доэрти от компании NXP с выходной мощностью 50 Вт (рисунок 18).

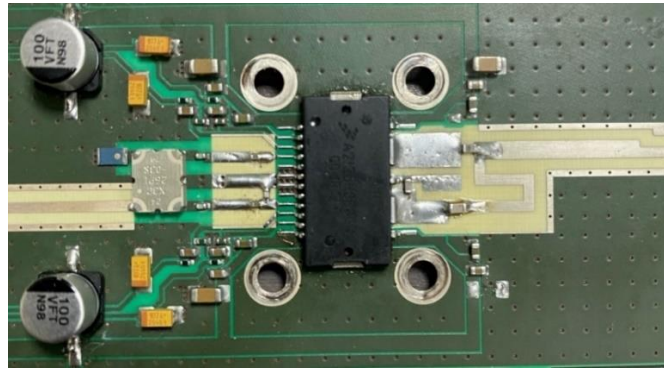


Рисунок 18 – Тестовая плата УМ по схеме Доэрти

Результаты измерений прототипа УМ класса G, УМ по схеме Доэрти, а также результатам передовых научных работ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение результатов работы

Архитектура	Источник	$P_{\text{вых макс, Вт}}$	Относительная полоса рабочих частот, $\Delta F/F_0$	КПД при $P_{\text{ОВО}} = 11,7\text{дБ, \%}$	КПД при $P_{\text{ОВО}} = 8\text{дБ, \%}$
ЕТРА на основе преобразования Фурье	статья, 2021	65	0,15	42	–
ЕТРА	статья, 2021	40	0,61	41,5	50
LMBA	статья, 2022	40	0,42	42	61
УМ по схеме Доэрти с распределенным усилением	статья, 2014	700	0,46	25	38
3 уровневый УМ класса G	данная работа	30	0,35	32,5	41,5
несимметричный инверсный УМ по схеме Доэрти	данная работа	50	0,16	22	38

При разработке УМ по схеме Доэрти следует найти компромисс между шириной рабочих частот и КПД при $P_{\text{ОВО}} = 11,7\text{дБ}$. Выбор архитектуры УМ класса G, ЕТРА и LMBA позволит избежать данного компромисса. Разработанный УМ класса G имеет широкий диапазон рабочих частот 700 – 1000 МГц ($\Delta F/F_0 = 0,35$), но на данный момент уступает современным статьям в значении КПД при $P_{\text{ОВО}} = 11,7\text{дБ}$. Однако, в диссертации показано, что применение APD-системы и увеличение числа уровней напряжения питания позволит получить схожие результаты.

Основные результаты и выводы работы

Разработан метод расчета КПД усилителя мощности класса G и ЕТРА. Приведены алгоритм синтеза УМ класса G и методика структурного синтеза схемы линеаризации УМ класса G и схемы коррекции комплексного K_y . Разработан прототип широкополосного УМ класса G и получены экспериментальные результаты, подтверждающие достоверность предложенного расчета.

Основные результаты и выводы работы сводятся к следующим утверждениям:

1. Пять уровней коммутации напряжения питания являются оптимальной величиной в синтезе УМ класса G при усилении OFDM-сигнала, так как КПД усилителя класса G при данном количестве уровней соответствует КПД усилителя мощности с отслеживанием огибающей.

2. При расчете КПД для ЕТРА согласно предложенной методике определяется диапазон изменения напряжения питания (в рассматриваемом примере 7,5 – 28 В), при котором достигается максимальный КПД ЕТРА.

3. Из анализа предложенных в работе схем коррекции амплитуды и фазы коэффициента усиления при коммутации напряжения питания следует, что схема на основе симметричных усилителей может быть применена для данной задачи только в том случае, когда зависимость амплитуды и фазы коэффициента усиления симметричных усилителей соотносится с коэффициентами усиления основного УМ согласно формуле (4).

4. Применение только схемы коррекции амплитуды и фазы коэффициента усиления при коммутации напряжения питания может быть достаточным методом в линеаризации УМ класса G, если усилитель мощности испытывает малую компрессию коэффициента усиления при каждом напряжении питания. Результаты моделирования УМ класса G со схемой коррекции показали улучшение КПД с 8,5 до 22% при сохранении параметра ACPР выходного сигнала.

Основные публикации автора по теме диссертации

1. Пятак И.М., Леонтьев Е.В. Моделирование радиотехнических устройств с регулируемыми параметрами в среде LabVIEW // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2015, № 4. С. 19–24 (ВАК, РИНЦ).

2. Леонтьев Е.В., Коротков А.С., Балашов Е.В., Березняк А.Ф. Применение среды LabVIEW в задачах автоматизированного проектирования СВЧ МИС в САПР Microwave Office // Сборник тезисов 2-ой международной научной конференции “Микроэлектроника-2016”, 2016, С. 384-385.

3. Леонтьев Е.В., Коротков А.С., Балашов Е.В., Березняк А.Ф. Применение среды LabVIEW в задачах автоматизированного проектирования СВЧ МИС в САПР Microwave Office // Наноиндустрия. №S (74), 2017, С. 531-533 (ВАК, РИНЦ).

4. Леонтьев Е.В., Коротков А.С., Балашов Е.В. Методика анализа на устойчивость GaN HEMT в режиме большого сигнала при синтезе МИС УМ в САПР Microwave Office // Сборник тезисов 3-ей международной научной конференции “Микроэлектроника-2017”, 2017, С. 374-375.

5. Леонтьев Е.В., Коротков А.С., Балашов Е.В. Методика анализа на устойчивость GaN HEMT в режиме большого сигнала при синтезе МИС УМ в САПР Microwave Office // Наноиндустрия. №S (82), 2018, С. 453-455 (ВАК, РИНЦ).

6. Леонтьев Е.В., Коротков А.С., Матвеев Ю.А. Усилитель мощности класса G для инфокоммуникационных систем // Сборник тезисов 7-ой международной научной конференции “Электронная компонентная база и микроэлектронные модули” российского форума “Микроэлектроника-2021”, 2021, С. 930-931.

7. Леонтьев Е.В. Коротков А.С. Матвеев Ю.А. Усилитель мощности класса G для инфокоммуникационных систем // Наноиндустрия. Спецвыпуск. том 14, №7s, (107), 2021, с.940-941 (ВАК, РИНЦ).

8. Леонтьев Е.В., Коротков А.С., Матвеев Ю.А. Усилитель мощности класса G для инфокоммуникационных систем // Наноиндустрия, том 15, №6 (116), 2022, С.368-375. DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.6.368.375 (ВАК, РИНЦ).

9. Ермаков С.Е., Леонтьев Е.В. Сравнительный анализ потребляемой мощности системы предсказаний для 5G базовых станций с малым покрытием соты // Материалы Всероссийской конференции “Неделя науки ИЭиТ”, 2022, С. 110-112.

10. Leontiev E.V. Class G power amplifier synthesis based on the probability density function dependence of the transmitted signal // Computing, Telecommunications and Control, vol. 17, №2, 2024, PP. 17–23 (ВАК, РИНЦ).