



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева»
(ФГБУ НИИР)

Почтовый адрес: Казакова ул., д. 16, Москва, 105064
Телефон: (495) 647-17-77, факс: (499) 261-00-90
E-mail: info@niir.ru, <http://www.niir.ru>
ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827
ИНН/КПП 9709082715/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
ФГБУ НИИР по науке,
кандидат технических наук, доцент



А.А. Захаров

2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного
бюджетного учреждения "Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский институт радио имени
М.И. Кривошеева на диссертационную работу Нгуен Данг Кань
«Исследование модуляционного тракта радиопередатчиков диапазона
ВЧ с раздельным усилением составляющих при работе на узкополосную
антенну» представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.2.13 - «Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения»

1. Актуальность темы исследования

Увеличение коэффициента полезного действия (КПД) передающего тракта, как наиболее энергоемкого узла любого оборудования радиосвязи и телерадиовещания, представляет собой актуальную задачу как для стационарных мощных применений (в силу влияния на эксплуатационные расходы), так и для портативных маломощных устройств (поскольку определяет продолжительность работы от одного комплекта источников электропитания). Наибольший КПД активных приборов достигается в ключевых режимах работы (классы D, E, F). Для усиления современных спектрально-эффективных вещательных и телекоммуникационных сигналов с переменной амплитудой (например, OFDM - Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) использование ключевых режимов работы возможно только при применении «синтетических» методов усиления, таких как дефазирование или метод раздельного усиления составляющих Л. Кана, а также их комбинаций. Наиболее перспективный из этих методов — метод

Вход. № 59/24
«27» 05 2024
подпись

раздельного усиления составляющих (Envelope Elimination and Restoration, EER), успешно применяемый в области мощного радиовещания в низкочастотном (НЧ), среднечастотном (СЧ) и высокочастотном (ВЧ) диапазонах, является объектом большинства исследований, направленных как на повышение рабочей частоты, так и на расширение полосы модулирующих частот.

В ряде случаев передающие устройства радиосвязи и радиовещания вынуждены функционировать с электрически короткой антенной. К таким устройствам относятся передатчики диапазона длинных волн, где полноразмерный четвертьволновый вертикальный вибратор при длине волны 2000 м сложно реализуем; размещенные на подвижных средствах антенны для связи с использованием зенитного излучения в нижней части ВЧ диапазона; носимые радиостанции ВЧ диапазона. Задачи согласования электрически коротких антенн, в том числе с электронным переключением, при необходимости быстрой смены рабочей частоты могут быть успешно решены только в относительно узкой полосе частот. Следовательно, передатчик оказывается нагружен на узкополосную цепь, состоящую из согласующего устройства и собственно антенны.

Ключевые усилители мощности достаточно устойчивы к рассогласованию нагрузки. Передатчики с раздельным усилением составляющих в случае широкополосного рассогласования также допускают работу на рассогласованную нагрузку. Однако при работе с OFDM-сигналами на узкополосную нагрузку высокоэффективные передатчики с разделением составляющих требуют согласования с антенной цепью с КСВ не хуже 1,05 в полосе частот усиливаемого сигнала.

Таким образом, сформулированная в диссертации научная проблема - снижения требований к полосе пропускания антенны для высокоэффективного ключевого передатчика с раздельным усилением составляющих является актуальной. Решение указанной проблемы позволит расширить пределы допустимого рассогласования узкополосной антенны для ключевых передатчиков с раздельным усилением составляющих, использующих широтно-импульсную модуляцию в модуляционном тракте, при работе с современными телекоммуникационными сигналами.

Основное внимание в работе уделено решению задачи синтеза структур модуляционного тракта передатчиков с раздельным усилением составляющих, обеспечивающих расширение пределов допустимого рассогласования узкополосной антенны.

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

- проводится анализ механизма возникновения нелинейных искажений при работе передатчика с раздельным усилением составляющих на узкополосную антенну;

- разрабатывается компьютерная модель для исследования спектра выходного сигнала передатчика с раздельным усилением составляющих при различных параметрах и конфигурациях модуляционного тракта;

- проводится исследование зависимости уровня искажений выходного сигнала от параметров фильтра модуляционного тракта;
- синтезируются аппаратные методы снижения требований к полосе пропускания антенны для передатчика с отдельным усилением составляющих.

2. Структура и основные результаты работы

Диссертация содержит введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, два приложения, 100 страниц текста, иллюстрируется 57 рисунками и 2 таблицами. Список литературы состоит из 68 наименований.

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

В **первом разделе** проведен анализ механизма возникновения искажений в передатчиках современных телекоммуникационных сигналов с отдельным усилением составляющих при их работе на узкополосную антенну. Показано, что при воздействии сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией на узкополосную антенну сопротивление нагрузки линейно-параметрически изменяется, вплоть до отрицательных значений. При этом сопротивление нагрузки модулятора передатчика с отдельным усилением составляющих становится нелинейным. Фильтр модулятора оказывается без резистивной нагрузки в верхней части его полосы пропускания, что приводит к искажению его АЧХ, а также к резкой неравномерности ГВЗ и появлению паразитных высокочастотных резонансных колебаний на его выходе.

Во **втором разделе** разработана имитационная модель для исследования ключевых ВЧ передатчиков современных телекоммуникационных сигналов с отдельным усилением составляющих, учитывающая особенности их работы на узкополосную нагрузку. Показана целесообразность использования метода транзитного анализа и программы схемотехнического моделирования Micro-Cap. Разработанная модель функционально состоит из трех блоков: - узкополосной антенны, усилителя мощности передатчика современных телекоммуникационных сигналов (ПСТС) с разделением составляющих и возбудителя. Модель позволяет изолированно исследовать процессы, протекающие в ФНЧ модулятора, являющиеся основной причиной возникновения искажений при работе ПСТС с отдельным усилением составляющих на резонансную нагрузку. Моделирование проводится с использованием реального DRM сигнала на достаточно больших интервалах времени, что позволяет нивелировать влияние статистических свойств сигнала. Результаты проведенных расчетов и их сравнение с данными проводившихся ранее экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной модели.

В **третьем разделе** проведены исследования внеполосных излучений передатчиков современных телекоммуникационных сигналов с отдельным усилением составляющих при использовании четырех вариантов фильтров в

модуляционном тракте - односторонне и двусторонне нагруженных с плавным и резким переходом, имеющих одинаковую степень подавления нежелательных продуктов тактовой частоты. Исследования проведены как для номинальной нагрузки (широкополосной антенны), так и для резонансных антенн с ограниченной полосой пропускания.

Для проведения анализа спектральных характеристик выходного сигнала передатчика при его работе на узкополосную антенну предварительно определена взаимосвязь между полосой пропускания антенны (для ее RCL модели) и максимальным КСВ на границах полосы DRM сигнала. После проведения строгого анализа получено упрощенное выражение, обеспечивающее погрешность не более 5%.

В результате проведенного моделирования получены зависимости минимально необходимой полосы пропускания фильтра модуляционного тракта от полосы пропускания антенны.

В четвёртом разделе рассмотрены аппаратные методы, направленные на снижение требований к полосе пропускания антенны - применение демпфирующей цепи и ФВЧ-диплексера на выходе ФНЧ модуляционного тракта, а также применение передатчика с многофазной ШИМ.

Поскольку нагрузка ВЧ тракта передатчика в виде узкополосной антенны эквивалентна нагрузке в виде последовательного колебательного контура и ее АЧХ симметрична относительно ее центральной частоты, в работе применен метод комплексной огибающей и заменен анализ прохождения узкополосного сигнала через избирательную цепь рассмотрением прохождения огибающей сигнала через низкочастотный эквивалент избирательной цепи.

Предложено на выходе ФНЧ модуляционного тракта устанавливать ФВЧ-диплексер в виде последовательно соединенных R и C. При этом R должно быть равно номинальному сопротивлению нагрузки ФНЧ модулятора, а величина емкости C рассчитывается из условия обеспечения частоты среза ФВЧ по уровню -3дБ, равной половине полосы пропускания антенны. Применение ФВЧ-диплексера в двусторонне нагруженном ФНЧ с плавным переходом позволяет снизить допустимую полосу пропускания антенны в шесть раз (со 150 до 25 кГц), что соответствует увеличению допустимого КСВ антенны с 1,07 до 1,47.

При использовании многофазной ШИМ задача подавления напряжения тактовой частоты и нескольких ближайших её гармоник решается их взаимной компенсацией за счет многофазности ШИМ, что существенно облегчает требования к ФНЧ. Однако его выходная ёмкость оказывается недостаточной для блокирования цепи питания ВЧ каскада по четным гармоникам рабочей частоты даже при малой полосе пропускания. Для устранения этого недостатка на выходе ФНЧ в работе предложено установить режектор, представляющий собой последовательный LCR колебательный контур с невысокой добротностью, настроенный на вторую гармонику рабочей частоты.

Многофазная ШИМ при использовании односторонне нагруженного ФНЧ 2-го порядка и установке в ячейках ВЧ-тракта режекторов 2-й гармоники рабочей частоты позволяет работать на антенны с полосой пропускания до половины полосы сигнала. Ограничения на полосу пропускания антенны и ее КСВ обусловлены только неравномерностью АЧХ антенны в полосе передаваемого сигнала. Недостатком данного метода является необходимость установки узкополосных режекторов, блокирующих цепь питания каждой ВЧ-ячейки по 2-й гармонике, что требует изготовления подобного передатчика под заказ на фиксированную рабочую частоту.

Сделан вывод, что наиболее перспективным решением является использование ФВЧ-диплексера, позволяющее относительно простыми средствами расширить допустимый КСВ узкополосной антенны в полосе сигнала с исходного значения 1,05 до 1,47.

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

В приложениях к работе представлен акт об использовании результатов диссертационной работы и полученное свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3. Научная новизна работы

- Определены обусловленные модуляционным трактом причины возникновения дополнительных искажений спектра выходного сигнала передатчиков с отдельным усилением составляющих при работе на узкополосные антенны.

- Разработан алгоритм имитационного моделирования спектра выходного сигнала передатчиков с отдельным усилением составляющих при работе на узкополосные антенны для различных конфигураций модуляционного тракта с использованием фрагмента реального сигнала.

- Выявлены зависимости минимально необходимой полосы пропускания фильтра модуляционного тракта от полосы пропускания антенны и величины КСВ на краях полосы усиливаемого сигнала для случая работы передатчика с отдельным усилением составляющих на узкополосную антенну, в том числе для предложенного применения двусторонне нагруженных фильтров.

- Проведен анализ известных и предложенных решений по расширению пределов допустимого рассогласования узкополосной антенны. Показано, что использование предложенного ФВЧ-диплексера совместно с двусторонне нагруженным ФНЧ модуляционного тракта обеспечивает снижение требований к КСВ антенны до максимального значения 1,47, а допустимая полоса пропускания антенны может быть уменьшена до 2,5 полос сигнала.

4. Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость заключается в обеспечении возможности работы передатчика с отдельным усилением составляющих с предложенным ФВЧ-диплексером совместно с двусторонне нагруженным ФНЧ

модуляционного тракта на узкополосные антенны с КСВ на краях полосы сигнала 1,47 вместо допускаясь ранее величины КСВ 1,05, что существенно расширяет возможные области применения данных высокоэффективных передатчиков.

5. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Результаты работы достоверны, что подтверждается корректностью использования математического аппарата и соответствием результатов численного моделирования с известными из литературы результатами экспериментальных исследований. Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами, в том числе на научных конференциях.

6. Личный вклад автора

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

7. Соответствие паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует п. 1. "Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем", п. 4. "Разработка и исследование устройств генерирования, усиления, преобразования и синтеза радиосигналов, сигналов изображения и звука в радиотехнических системах различного назначения, включая системы телевидения. Создание эффективных методов их расчета и основ проектирования", и п. 7. "Разработка и исследование методов обеспечения электромагнитной совместимости радиотехнических систем и устройств, включая системы связи и телевидения, методов обеспечения их стойкости к электромагнитному и ионизирующему излучению, методов разрушения и защиты информации в этих системах" паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

8. Апробация результатов работы

Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами на научных конференциях, подготовлено 3 доклада. Основные результаты диссертационной работы отражены в 3 работах в журналах, включенных в перечень ВАК, 4 работы проиндексированы в базах данных Web of Science и SCOPUS (две из которых в журналах первой четверти).

9. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Разработанные Нгуен Данг Кань критерии и предложенный ФВЧ-диплексер совместно с двусторонне нагруженным ФНЧ модуляционного

тракта могут быть применены в радиопередающих устройствах с отдельным усилением составляющих при работе на узкополосные антенны, что существенно расширяет возможные области применения данных высокоэффективных передатчиков.

10. Замечания по диссертационной работе

К замечаниям по результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. В работе не рассмотрено совместное влияние неидеальности модуляционного тракта и других причин возникновения искажений (таких как нелинейность модуляционной характеристики и неравномерность фазо-амплитудной характеристики высокочастотного тракта) на искажения спектра выходного сигнала.

2. Анализ работы на узкополосную антенну проведен в работе в приближении постоянства активной части ее входного сопротивления в полосе частот сигнала.

3. В диссертации не пояснено, что такое " R^2 " на странице 56 и на Рисунке 3.18.

4. Некорректно использовано обозначение "мС" на стр. 32.

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

11. Заключение

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

Отзыв подготовила:

Иванкович Мария Владимировна, кандидат технических наук, 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», заместитель директора Цента исследования перспективных беспроводных технологий связи, Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП НИИР), Россия, 105064, Россия, г. Москва, ул. Казакова, 16, Тел.: +7 (495) 647-17-77, доб. 2651, e-mail: ivankovichmv@niir.ru.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на заседании секции научно-технического совета НТЦ Анализа электромагнитной совместимости ФГБУ НИИР 23.05.2024, протокол № 035-24-05-01.

Заместитель директора ЦИ ПБТС, к.т.н.



М.В. Иванкович

«24» 05 2024 г.

Подпись М.В. Иванкович заверяю
Директор службы персонала ФГБУ НИИР



В.А. Тютюнова

«24» 05 2024 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГБУ НИИР).

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

Веб-сайт: <http://niir.ru/>.

Тел.: (495) 647-17-77, факс: (499) 261-00-90.

Адрес электронной почты: info@niir.ru.