

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Жизняковой Натальи Александровны на тему «Математические модели быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы для формирования высокочастотных сигналов с малым уровнем фазовых шумов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Актуальность темы исследования. В современных условиях развития радиотехнических систем наблюдается устойчивая тенденция к повышению требований к рабочим частотам и методам передачи данных. Радиотехнические комплексы различного назначения – от телекоммуникационных систем и радиолокационных комплексов до медицинского диагностического оборудования – требуют применения высокочастотных сигналов с улучшенными спектральными и динамическими характеристиками. Особую значимость приобретает разработка технологий работы в миллиметровом диапазоне волн (до 100 ГГц и выше), а также внедрение современных методов широкополосной передачи информации.

Существующие технические решения формирования высокочастотных сигналов имеют определенные трудности и ограничения. Системы ФАПЧ обеспечивают высокое качество выходного сигнала, но характеризуются низким быстродействием при перестройке рабочей частоты. Системы прямого цифрового синтеза (DDS) на базе ЦАП лишены этого недостатка, однако их применение на высоких частотах ограничено тактовой частотой прямого цифрового синтеза. Перспективным направлением развития является гибридная архитектура систем синтеза и стабилизации частот, где ключевую роль играют быстродействующие ЦАП. При этом актуальной задачей становится разработка методов повышения эффективности формирования высокочастотных сигналов с одновременным снижением уровня фазовых шумов.

Особую значимость приобретает исследование возможностей использования специальных режимов работы ЦАП для формирования высокочастотных сигналов посредством образов основной частоты в высших зонах Найквиста. Это позволяет не только увеличить выходную частоту, но и существенно снизить спектральную плотность мощности фазовых шумов. Таким образом, разработка математических моделей быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой позволит создать новые поколения

высокочастотных формирователей сигналов с улучшенными спектральными характеристиками.

Объектом исследования являются быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи, использующие для повышения выходной частоты копии спектра (образы) основной частоты в высших зонах Найквиста, **предметом исследования** – математические модели быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, использующие образы основной частоты для повышения выходной частоты и уменьшения уровня фазовых шумов.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 163 страницах машинописного текста и включает в себя все необходимые элементы научно-квалификационной работы: введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Объем работы свидетельствует о достаточной глубине проработки темы и соответствии требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация и автореферат оформлены в полном соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011, текст изложен логично и грамотно, работа содержит достаточное количество иллюстративного, графического и табличного материала.

В первой главе проанализированы современные методы повышения выходной частоты формирователей сигналов, при этом особое внимание уделено возможности применения быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей и их специальных режимов работы. Автором обоснована актуальность использования спектральных образов основной частоты для увеличения выходной частоты и показана перспективность данного подхода по сравнению с традиционными методами формирования сигналов.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, также в ней впервые предложены два новых режима работы – RFZ3 и RFZ4. В данной главе представлены результаты математического моделирования спектров выходного сигнала, введен коэффициент эффективного преобразования, позволяющий количественно оценить преимущества использования образов основной частоты в различных зонах Найквиста.

Третья глава содержит разработку математических моделей шумовых характеристик быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы. Особого внимания заслуживает модернизированная методика определения коэффициентов модели спектральной плотности мощности фазовых шумов при недостаточности экспериментальных данных. В данной главе также представлены результаты анализа шумовых характеристик для всех рассмотренных режимов, включая предложенные автором режимы RFZ3 и RFZ4.

Четвертая глава посвящена практическому применению разработанных моделей. В данной главе представлен алгоритм частотного планирования быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, разработано соответствующее программное обеспечение, выполнены расчеты для конкретных микросхем ЦАП AD9164 и AD9172. Кроме того, предложена и исследована схема гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего ЦАП, защищенная патентом на полезную модель.

Заключение содержит основные результаты и выводы по работе. Список литературы включает 110 наименований, в том числе 24 публикации автора. В приложениях приведены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, патент на полезную модель и акты внедрения результатов. В целом структура диссертации является логичной и последовательной, отражает все этапы научного исследования.

В диссертационной работе были последовательно решены следующие **задачи исследования**:

1) выполнен анализ применения быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в формирователях высокочастотных радиосигналов;

2) разработаны математические модели быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, использующие для повышения выходной частоты копии спектра (образы) основной частоты;

3) разработаны новые специальные режимы работы быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей для увеличения амплитуд копий спектра (образов) основной частоты в высших зонах Найквиста;

4) разработаны математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы;

5) предложен алгоритм частотного планирования цифро-аналоговых преобразователей для определения параметров ЦАП из условия минимума фазовых шумов;

6) рассмотрены примеры применения известных и предложенных специальных режимов работы цифро-аналоговых преобразователей для синтеза высокочастотных радиосигналов с низким уровнем фазовых шумов.

Научная новизна результатов диссертационной работы. Принципиально новыми результатами исследования, определяющими его научную новизну, являются:

1. Разработаны математические модели быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы (NRZ, 2xNRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2), которые используют для повышения выходной частоты копии спектра (образы) основной частоты, защищены свидетельством о

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683305 (дата регистрации 05.12.2022 г.).

2. Впервые предложены два новых специальных режима работы быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, позволяющие увеличить амплитуды образов основной частоты в высших зонах Найквиста (5...11) в среднем на 10...22 дБ (RFZ3, RFZ4) по сравнению с NRZ.

3. Разработаны математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы.

4. Разработан алгоритм частотного планирования быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, позволяющий обеспечить требуемые параметры (частоты) быстродействующих ЦАП при минимальном уровне фазовых шумов на заданных выходных частотах.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Обоснованность и достоверность научных положений, выносимых на защиту, подтверждаются следующими факторами: компьютерным моделированием разработанных математических моделей быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, результаты которого согласуются с экспериментальными данными; сопоставимостью результатов теоретических исследований с шумовыми характеристиками, представленными в технических описаниях интегральных микросхем быстродействующих ЦАП; практической реализацией предложенных технических решений, подтвержденной актом внедрения в АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»; апробацией результатов на международных и всероссийских научно-практических конференциях; публикации основных результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, включая журналы, входящие в перечень ВАК РФ (8 статей) и индексируемые в Scopus (3 статьи); патентом на полезную модель и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, подтверждающими практическую значимость полученных результатов; использованием результатов при выполнении научных исследований в рамках грантов Президента РФ и Российского научного фонда. Таким образом, совокупность использованных методов исследования, полученных результатов и их верификации обеспечивает высокую степень достоверности научных положений диссертации.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Теоретическая значимость исследования заключается в развитии методологии математического моделирования быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, что позволило существенно расширить понимание процессов формирования высокочастотных сигналов с

использованием образов основной частоты в высших зонах Найквиста. Полученные результаты создают научную базу для дальнейшего развития теории и практики синтеза радиосигналов, включая разработку новых методов оценки и минимизации фазовых шумов, а также оптимизации параметров формирователей сигналов на основе ЦАП. Разработанные математические модели и методики позволяют проводить комплексный анализ эффективности различных режимов работы ЦАП, что открывает новые перспективы в области проектирования современных радиотехнических систем.

Практическая значимость подтверждается внедрением результатов диссертационной работы в исследования по НИОКР при разработке формирователей сигналов радиосистем на АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов» и учебный процесс кафедры радиотехники Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета.

Замечания по диссертационной работе. Отмечая научный уровень диссертации, необходимо указать на некоторые ее недостатки, которые вызывают замечания и носят дискуссионный характер:

1. В главе 2 вводится понятие коэффициента эффективного преобразования $K_{\text{эфф}}$, который одновременно учитывает выигрыш по частоте и проигрыш по амплитуде. Рассматривался ли вариант нормировки этого коэффициента на энергетические потери, связанные с изменением формы импульсов в специальных режимах (например, увеличение скважности в режиме RZ приводит к снижению средней мощности)? Если нет, то не приведет ли это к завышению оценки эффективности при практической реализации?

2. В разделе 3.2.2 автор пренебрегает составляющей $1/F^2$ и шумами квантования при разрядности ЦАП больше 14. Допущение выглядит обоснованным для большинства практических случаев, однако хотелось бы услышать пояснение: насколько критичным может стать влияние этих составляющих при работе в высших зонах Найквиста (например, в 9–11-й), где амплитуда сигнала существенно ослаблена и отношение сигнал/шум падает?

3. В четвертой главе приведены результаты частотного планирования для гипотетической ЦАП с параметрами AD9164. Насколько предложенный алгоритм и программное обеспечение универсальны для других типов быстродействующих ЦАП? Какие параметры микросхемы являются критически важными для корректного расчета?

4. Из материалов диссертации следует, что предложенные режимы RFZ3 и RFZ4 ориентированы на увеличение амплитуд образов в 5–11-й зонах Найквиста. Чем обоснован выбор именно этого частотного интервала?

Рассматривалась ли автором теоретическая возможность эффективного использования спектральных копий в еще более высоких зонах?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях.

Заключение. Диссертационная работа Жизняковой Натальи Александровны является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для улучшения характеристик формирователей высокочастотных сигналов.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационной работы. Основные результаты в достаточной мере опубликованы в 24 работах, включая 8 статей из перечня ВАК, 3 статьи в сборниках трудов, индексируемых Scopus, патент на полезную модель и два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Жизнякова Наталья Александровна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент

профессор кафедры

доктор технических наук, профессор

« 8 » июля 2026 г.

 А. Леншин

Сведения об оппоненте:

Леншин Андрей Валентинович, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук (научная специальность 20.01.12 «Радиоэлектронная борьба (способы и средства)», профессор, профессор 101 кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

Почтовый адрес (рабочий): 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а.

Телефон рабочий: (473) 226-60-13, телефон мобильный: +7 (920) 229-09-95.

E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru

Подпись Леншина Андрея Валентиновича заверяю.
Начальник ОК ВУНЦ ВВС «ВВА»  И. Чужинов
« 8 » июля 2026 г.

