

На правах рукописи



ЖИЗНЯКОВА Наталья Александровна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРО-
АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ
РАБОТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
С МАЛЫМ УРОВНЕМ ФАЗОВЫХ ШУМОВ**

Специальность: 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир – 2026

Работа выполнена на кафедре радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

- Научный руководитель:** **Ромашов Владимир Викторович**
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
- Официальные оппоненты:** **Леньшин Андрей Валентинович**
доктор технических наук, 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)
- Королев Алексей Владимирович**
кандидат технических наук, доцент, начальник отдела разработки синтезаторов частот и сигналов Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники» (г. Москва)
- Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва, Зеленоград

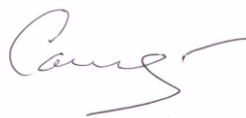
Защита диссертации состоится 29 сентября 2026 года на заседании диссертационного совета Д 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1 и на сайте <https://diss.vlsu.ru/index.php?id=453>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: ags@vlsu.ru.

Автореферат разослан 10 июня 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.01
кандидат технических наук, доцент



С.А. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования. Радиотехнические системы – от телекоммуникаций и радиолокации до медицинской аппаратуры – на современном этапе развития предъявляют всё более высокие требования к рабочим частотам и методам передачи данных. В связи с этим критически важными становятся исследования в области миллиметрового диапазона волн, а также технологий широкополосной передачи и сложных схем модуляции (таких как OFDM и massive MIMO).

Преимуществом использования систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в формирователях радиосигналов является высокое качество выходного сигнала с низким уровнем фазовых шумов, а недостатком — снижение быстродействия при изменении рабочей частоты. Системы прямого цифрового синтеза (DDS), в основе которых лежат быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), не имеют присущих системам ФАПЧ ограничений по скорости перестройки частоты, однако их применение на высоких частотах сдерживается недостаточно высокой основной частотой прямого цифрового синтеза, определяемой тактовой частотой.

Перспективным путем развития техники является гибридизация и оптимизация архитектур прямого цифрового синтеза, где ключевым элементом становится быстродействующий ЦАП. Особенностью систем цифрового синтеза является присутствие в спектре выходного сигнала ЦАП побочных спектральных составляющих - зеркальных отражений гармоник основного сигнала относительно частоты тактирования и кратных ей значений («образов» основной частоты или «копий спектра»). В этом случае увеличение выходной частоты формирователей радиосигналов достигается изменением формы огибающей спектра таким образом, чтобы увеличить амплитуды высокочастотных копий спектра (образов) в высших зонах Найквиста. Повышение выходной частоты в системах синтеза на основе ЦАП за счет применения образов основной частоты исследовалось в работах ряда таких ученых, как V. F. Kroupa, U. L. Rohde, J. Vankka, A. Chenakin, V. Manassevitch, D. B. Leeson, E. Drucker, Ajay Kuckreja, S. Overhoff, W. Kester, A.B. Королева, В.Н. Кочемасова, Л.И. Ридико, В.В. Ромашова, К.К.

Храмова, А.Н. Докторова, К.А. Якименко, разработчиков микросхем интегральных синтезаторов компаний Analog Devices и Maxim Integrated.

Увеличение амплитуд гармоник высокочастотных копий спектра, находящихся в высших зонах Найквиста, достижимо при использовании специальных режимов работы быстродействующих ЦАП, позволяющих повысить выходную частоту формирователей сигналов с одновременным уменьшением спектральной плотности мощности фазовых шумов (СПМ) в одиночной полосе частот. Таким образом, задача разработки экспериментально подтвержденных математических моделей быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы является актуальной.

Цель диссертационной работы — уменьшение уровня фазовых шумов быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей при повышении частоты формируемых радиосигналов за счет использования образов основной частоты в высших зонах Найквиста.

Задачи исследования:

- анализ применения быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в формирователях высокочастотных радиосигналов;
- разработка математических моделей быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, использующих для повышения выходной частоты копии спектра (образы) основной частоты;
- разработка новых специальных режимов работы быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей для увеличения амплитуд копий спектра (образов) основной частоты в высших зонах Найквиста;
- разработка математических моделей шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы;
- предложить алгоритм частотного планирования цифро-аналоговых преобразователей для определения параметров ЦАП из условия минимума фазовых шумов;
- рассмотреть примеры применения известных и предложенных специальных режимов работы цифро-аналоговых преобразователей для синтеза высоко-

частотных радиосигналов с низким уровнем фазовых шумов.

Объект исследования — быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи, использующие для повышения выходной частоты копии спектра (образы) основной частоты в высших зонах Найквиста.

Предмет исследования — математические модели быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, использующих образы основной частоты для повышения выходной частоты и уменьшения уровня фазовых шумов.

Методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертационном исследовании, были применены методы спектрального анализа, компьютерного и математического моделирования радиотехнических систем.

Научная новизна работы:

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.

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.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Полученные модели быстродействующих ЦАП в режимах работы NRZ, 2xNRZ, RZ, RF, RFZ и RFZ2 позволяют проводить исследования формирования

высокочастотных сигналов с помощью копий спектра в высших зонах Найквиста (2, 3, 4, 5...11).

2. Предложенные новые режимы RFZ3 и RFZ4 позволяют формировать высокочастотный радиосигнал с большей, по сравнению с известными режимами работы, амплитудой образов в высших зонах Найквиста (6...10) с пониженным уровнем фазовых шумов (на 14,8 дБ в 8 зоне Найквиста).

3. Разработанные математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей позволяют с высокой степенью точности провести оценку уровня шумов выходного сигнала на этапе проектирования.

4. Предложенный алгоритм частотного планирования быстродействующих ЦАП позволяет по исходным данным получить соотношения частот и параметров цифро-аналогового преобразователя (в том числе произвести выбор наилучшего специального режима работы) при минимальном уровне фазовых шумов.

5. Предложенная схема гибридного синтезатора на основе быстродействующих ЦАП в специальных режимах позволяет формировать высокочастотный опорный сигнал ФАПЧ, что позволяет получить пониженный на 29 дБ уровень спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов в одиночной боковой полосе по сравнению с обычной ФАПЧ. Схема защищена патентом на полезную модель №214526.

Достоверность результатов работы подтверждена компьютерным моделированием. Модели спектральной плотности мощности фазовых шумов ЦАП в специальных режимах работы соответствуют шумовым характеристикам, взятым из технического описания ряда интегральных микросхем быстродействующих ЦАП.

На защиту выносятся:

1. Модели быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы 2xNRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2 с использованием образов основной частоты и результаты их анализа, в том числе модели предложенных двух новых специаль-

ных режимов работы RFZ3 и RFZ4, обеспечивают увеличение амплитуд копий спектра (образов) в высших зонах Найквиста.

2. Математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, учитывающие влияние специальных режимов работы, и модернизированная методика получения коэффициентов модели.

3. Алгоритм частотного планирования быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы, позволяющий по исходным данным определить соотношения между частотами ЦАП и его параметрами из условия минимума фазовых шумов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XII–XVII Всероссийских научных Зворыкинских чтениях «Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России» и «Научный потенциал молодежи – будущее России» (Муром, 2019-2025); Всероссийских открытых Армандовских чтениях «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике», «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (Муром, 2019–2024); 77-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (Москва, 2022 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2023 г.); 33-й Международной научно-технической конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2023 г.); 79-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (Москва, 2024 г.).

Публикации. По тематике исследований опубликовано 24 работы, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, 4 статьи в журналах РИНЦ; 3 статьи в сборниках трудов, индексируемых Scopus; 6 тезисов докладов на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях. Получен патент на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистра-

ции программ для ЭВМ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в исследования по НИОКР при разработке формирователей сигналов радиосистем на АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов»; внедрены в учебный процесс кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» при проведении занятий по курсам «Цифровые синтезаторы частот» и «Радиопередающие устройства»; использованы при выполнении гранта Президента Российской Федерации МК–4044.2021.4 (2021 г.) и гранта РНФ №22–79–00149 (2022 г.).

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 3, 4, 15 паспорта специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 163 страницы машинописного текста, включая 93 рисунка и 31 таблицу. Список литературы содержит 110 наименований, в том числе 31 работу автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов и структуре диссертации.

Первая глава посвящена анализу актуального состояния проблемы повышения выходной частоты формирователей радиосигналов.

Для формирования высокочастотных сигналов используются быстродействующие ЦАП, а для повышения их выходной частоты перспективным является применение высокочастотных образов основной частоты. Выходная частота образов определяется выражением:

$$f_{обp} = |nf_T + f_{ЦАП}|, \quad (1)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ – номер образа, f_T – тактовая частота, $f_{ЦАП}$ – частота

на выходе ЦАП при $n = 0$.

Однако огибающая спектра выходного сигнала быстродействующих ЦАП в режиме работы NRZ изменяется в соответствии с функцией $\text{sinc}(x)$, из-за чего амплитуда образов, находящихся в высших зонах Найквиста (от 2-й и выше), уменьшается с ростом частоты — рисунок 1.

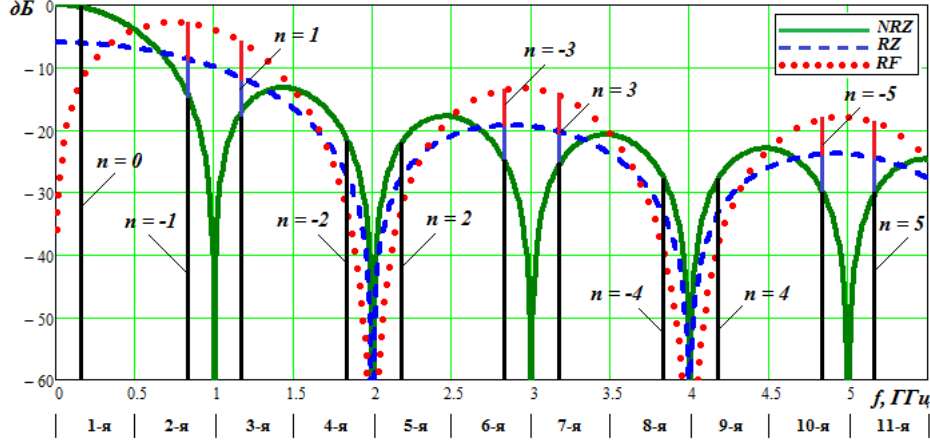


Рисунок 1 – Модули нормированной огибающей спектра выходного сигнала ЦАП

Применение специальных режимов работы быстродействующих ЦАП позволяет перераспределить энергетические соотношения и увеличить амплитуды высокочастотных образов основной частоты и при этом уменьшить СПМ фазовых шумов в одиночной полосе частот.

Во второй главе разработаны математические модели быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей, позволяющие формировать радиосигналы при помощи образов основной частоты.

Для режима NRZ и известных специальных режимов работы ЦАП (2xNRZ, RZ, RF, RFZ и RFZ2) получены выражения коэффициентов передачи по амплитуде, соответствующие модулям нормированной огибающей спектра выходного сигнала:

$$K_{NRZ}(K_{ЦАП}, n) = \frac{\sin\left(\pi \left| n + K_{ЦАП} \right| \right)}{\left(\pi \left| n + K_{ЦАП} \right| \right)}, \quad (2)$$

$$K_{2xNRZ}(K_{ЦАП}, n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \left| n + K_{ЦАП} \right|}{2}\right)}{\left(\frac{\pi \left| n + K_{ЦАП} \right|}{2}\right)}, \quad (3)$$

$$K_{RZ}(K_{ЦАП}, n) = \frac{1}{q} \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{|n + K_{ЦАП}|}{q}\right)}{\pi \frac{|n + K_{ЦАП}|}{q}}, \quad (4)$$

$$K_{RF}(K_{ЦАП}, n) = \frac{2 \left(\sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{2}\right) \right)^2}{\pi |n + K_{ЦАП}|}, \quad (5)$$

$$K_{RFZ}(K_{ЦАП}, n) = \frac{2 \left(\sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{q}\right) \right)^2}{\pi |n + K_{ЦАП}|}, \quad (6)$$

$$K_{RFZ2}(K_{ЦАП}, n) = \frac{2 \left(\sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{q}\right) \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{2}\right)}{\pi |n + K_{ЦАП}|}, \quad (7)$$

где $K_{ЦАП} = f_{ЦАП} / f_T$ — коэффициент передачи ЦАП, q — скважность тактовых импульсов.

Анализ спектров выходного сигнала ЦАП в известных специальных режимах работы показал, что амплитуды высокочастотных образов увеличились из-за изменения формы огибающей спектра. Для трех значений $K_{ЦАП}$ 0,1, 0,25 и 0,35 выигрыш в сравнении с режимом NRZ наблюдался во 2 –7, 10 – 12 зонах Найквиста и составил от 2 до 17 дБ. Однако ни один из известных специальных режимов работы ЦАП не позволяет обеспечить рост уровня амплитуд образов в 8-й и 9-й зонах Найквиста ($n=-4$ и $n=4$ соответственно).

Для оценки эффективности специальных режимов работы ЦАП введено понятие коэффициента эффективного преобразования $K_{эфф}$, который учитывает одновременный рост частоты и снижение амплитуды образа относительно основного (нулевого) для режима NRZ:

$$K_{эфф} = \frac{f_{обр}}{f_{ЦАП}} \cdot \frac{A_{обр}}{A_0} = \frac{|n + K_{ЦАП}|}{K_{ЦАП}} \cdot \frac{A_{обр}}{A_0}, \quad (8)$$

где A_0 — амплитуда нулевого образа NRZ, $A_{обр}$ — амплитуда соответствующего образа n для специального режима работы.

Предложены два новых режима работы быстродействующих ЦАП — RFZ3 и RFZ4. Выражения для коэффициентов передачи по амплитуде ЦАП в этих режимах имеют вид:

$$K_{RFZ3}(K_{ЦАП}, n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{8}\right) \left[\sin\left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{8}\right) + \sin\left[5 \cdot \left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{8}\right)\right] \right]}{4}, \quad (9)$$

$$K_{RFZ4}(K_{ЦАП}, n) = \frac{\sin c \left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{8} \right) \left[\sin \left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{8} \right) + \sin \left[3 \cdot \left(\frac{\pi |n + K_{ЦАП}|}{8} \right) \right] \right]}{4}. \quad (10)$$

На рисунке 2 показаны модули нормированной огибающей спектров вы-

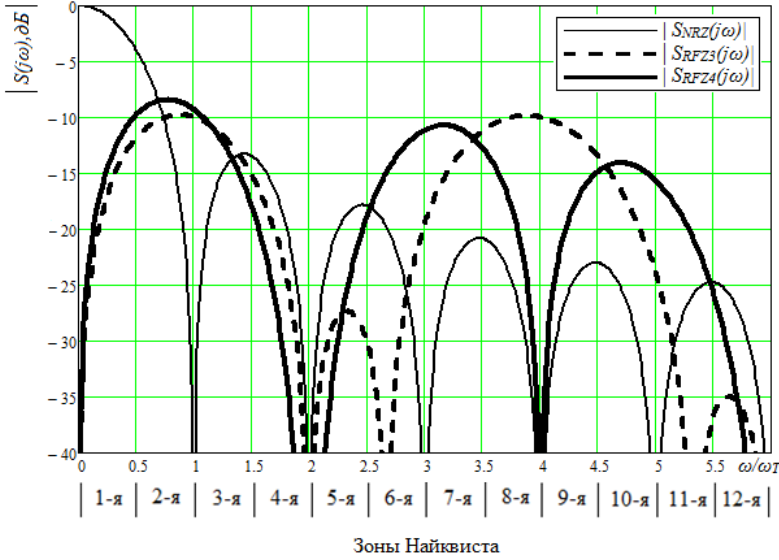


Рисунок 2 - Модули нормированной огибающей спектра на выходе ЦАП в режимах работы NRZ, RFZ3 и RFZ4

ходного сигнала ЦАП в режимах работы NRZ, RFZ3 и RFZ4. Результаты моделирования показали, что наибольший выигрыш в уровне амплитуд образов по сравнению с NRZ данные режимы демонстрируют во 2, 3, 6-11 зонах Найквиста (от 11 до 22 дБ).

В третьей главе разработаны математические мо-

дели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы.

В качестве математической модели СПМ собственных фазовых шумов в одиночной боковой полосе ЦАП на основной частоте применена модернизированная модель для цифрового вычислительного синтезатора

$$S_{ЦАП}(F) = K_{ЦАП}^2 \left(\frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3}, \quad (11)$$

где коэффициенты k_1, k_3, k_4 определяют уровень фликкер-шума $1/F$, естественных составляющих входных цепей, естественной шумовой составляющей сопротивления нагрузки, соответственно.

Для определения коэффициентов модернизированной модели СПМ фазовых шумов ЦАП на основной частоте для ЦАП (11) использована известная методика для цифровых вычислительных синтезаторов на основе имеющихся зависимостей СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе для нескольких

выходных частот в техническом описании микросхем.

Для снижения погрешности аппроксимации (на 3-5 дБ) предложена методика расчета этих коэффициентов на основе регрессии выборки данных линейной комбинацией функций вида $g(F) = \sum_{i=0}^2 C_i F^{-i}$ на основе данных о СПМ фазовых шумов.

В этом случае коэффициенты модели определяются по формулам $k_1 = \lg C_1$, а коэффициенты k_3 и k_4 выражаются из уравнения $10^{k_4} (K_{\text{ЦАП}})^2 + 10^{k_3} = 10^{C_0}$ для двух выходных частот, для которых имеются шумовые характеристики.

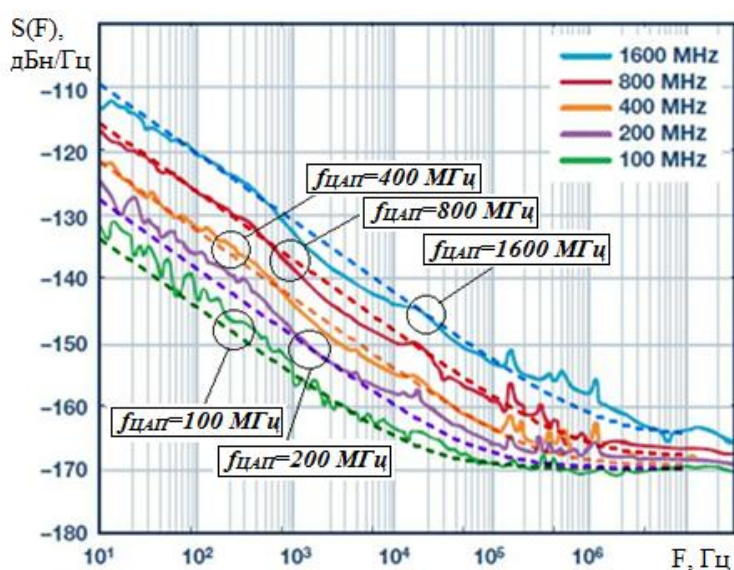


Рисунок 3 – Экспериментальные и теоретические (пунктиром) СПМ собственных фазовых шумов ЦАП AD9164 при тактовой частоте $f_T = 6$ ГГц

Для ЦАП AD9164 рассчитанные коэффициенты модели СПМ собственных фазовых шумов в одиночной боковой полосе $k_1 = -8,844$, $k_3 = -17$, $k_4 = -15,517$, а результаты моделирования приведены на рисунке 3. Видно достаточно хорошее совпадение теоретических зависимостей с экспериментальными.

Для случая недостаточности имеющихся данных, когда в техническом описании микросхем приведено только несколько (как правило, 2) численных значений СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе либо только характеристика для одной выходной частоты, разработана модернизированная методика получения коэффициентов математической модели шумовой характеристики ЦАП с использованием этих данных.

Результаты моделирования СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе с коэффициентами ($k_1 = -6,88$, $k_3 = -16,1$, $k_4 = -14,47$), определенными по этой методике на основании имеющихся в описаниях ЦАП LTC2000A только

данных для одной выходной частоты, приведены на рисунке 4. Отличие от экспериментальных характеристик составляет всего несколько децибел.

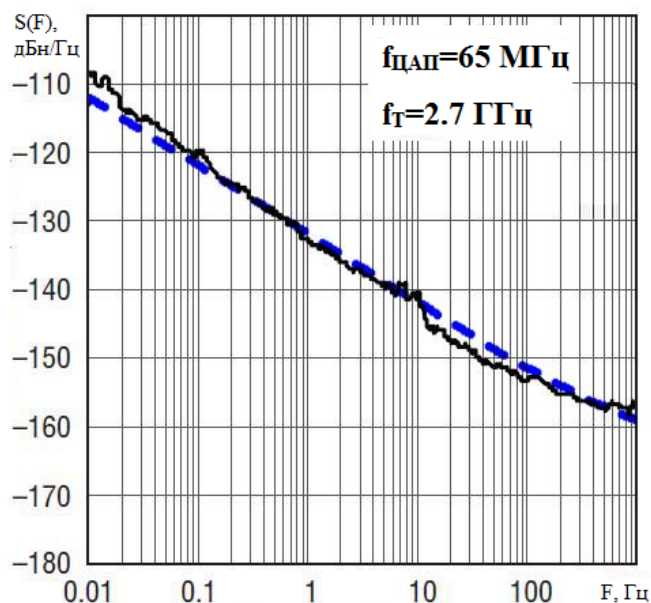


Рисунок 4 – Экспериментальные и теоретические (пунктиром) СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе частот ЦАП LTC2000A

Коэффициенты модели (11) рассчитаны для ЦАП AD9166, AD9171, AD9171, AD9082, AD9144, LTC2000, LTC2000A, а моделирование по ним шумовых характеристик показало достаточную для практических задач точность.

Для случая, когда в описании ЦАП имеются шумовые характеристики с учетом шумов генератора опорной частоты $S_{Гоч}(F)$, расчетная формула результирующей характеристики:

$$S_{ЦАП}(F) = S_{ЦАП_соб.}(F) + S_{Гоч}(F) \cdot K_{ЦАП}^2. \quad (12)$$

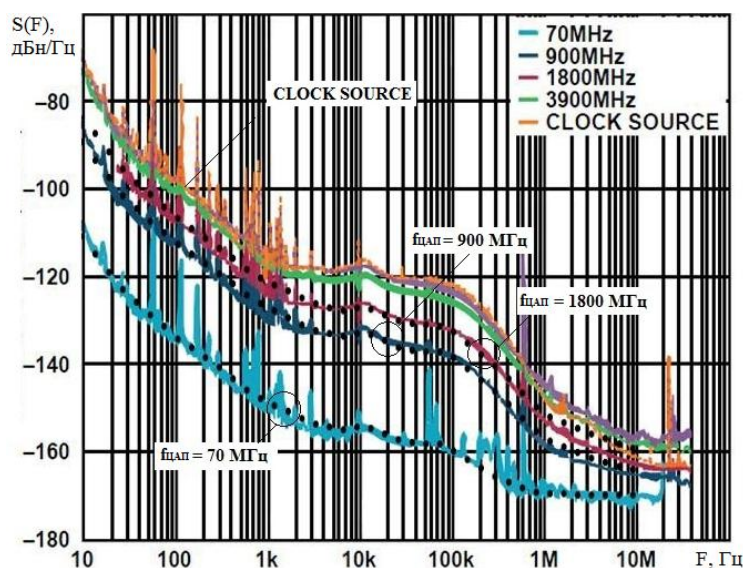


Рисунок 5 - СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе частот ЦАП AD9164 (экспериментальные и теоретические (точками)) с учетом шумов ГОЧ

Моделирование СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе быстродействующих ЦАП с учетом шумов ГОЧ по выражению (12) показало хорошее совпадение с экспериментом (рисунок 5).

В обобщенном виде математическую модель СПМ фазовых шумов быстродействующего ЦАП на образцах основной частоты в

различных режимах работы можно записать следующим образом:

$$S_{\text{ЦАП_обр}}(F) = S_{\text{ЦАП}}(F) \cdot Z_i^2(K_{\text{ЦАП}}, n), \quad (13)$$

где $Z_i(K_{\text{ЦАП}}, n) = 1/K_i(K_{\text{ЦАП}}, n)$ – коэффициенты передачи фазовых шумов ЦАП в специальных режимах работы (обратные величины коэффициентов передачи по амплитуде каждого из режимов – выражения (2)-(7),(9),(10).

На рисунке 6,а в качестве примеров приведены построенные по (13) СПМ фазовых шумов ЦАП AD9164 (для имеющихся режимов в этой микросхеме NRZ, RZ, RF) и гипотетического ЦАП с шумами, как у AD9164, для режимов RFZ3 и RFZ4 (рисунок 7,б).

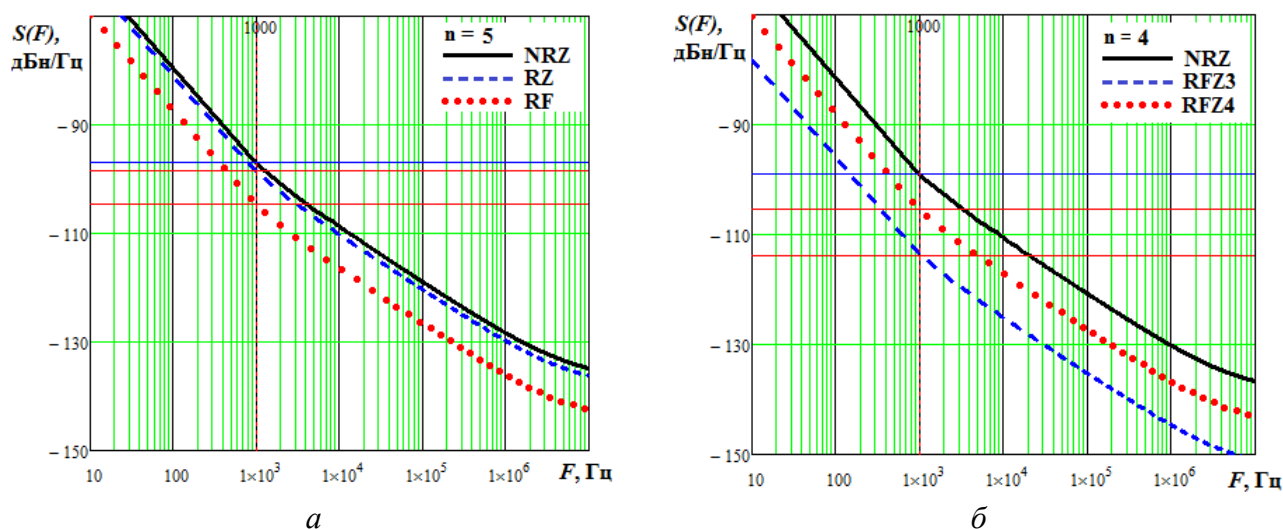


Рисунок 6 – СПМ фазовых шумов гипотетического ЦАП AD9164 в соответствующих режимах работы при $K_{\text{ЦАП}}=0,25$ и $f_T = 1,5$ ГГц

Моделирование показало, что практически все специальные режимы демонстрируют выигрыш в уровне фазовых шумов по сравнению с NRZ (максимальный выигрыш составил 14,8 дБ в 9-й зоне Найквиста $n=4$). Кроме того, новые специальные режимы работы ЦАП RFZ3 и RFZ4 демонстрируют снижение уровня фазовых шумов в сравнении с уже известными режимами во всех вышних зонах.

В четвертой главе разработан алгоритм частотного планирования быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы. Он позволяет рассчитать варианты реализации ЦАП для заданной выходной частоты по имеющимся исходным данным — выходной частоте (соответствует частоте образа), допустимым тактовым частотам ЦАП и возможным частотам ГОЧ. Результатом расчетов частотных планов является следующий набор параметров: режим работы быстродей-

ствующего ЦАП, номер и знак образа основной частоты, максимальное значение амплитуды образа, необходимый коэффициент умножения умножителя тактовой частоты, коэффициент передачи ЦАП, тактовая частота ЦАП, значение коэффициента эффективного преобразования.

Этапы алгоритма частотного планирования:

1. Вычисляется среднее значение коэффициента передачи ЦАП $K_{ЦАП}$ (из диапазона от 0,15 до 0,35).

2. Задается $n_{\max}$ максимальное количество образов основной частоты, для которых будет выполняться расчет частотного плана.

3. В зависимости от типа используемого ЦАП устанавливается допустимый диапазон значений коэффициента умножения УЧ $n1$. Выполняется расчет тактовых частот для различных коэффициентов умножения $f_T(n1) = f_{ГОЧ} \cdot n1$.

4. Производится расчет возможных значений коэффициента передачи ЦАП для заданных $n \neq 0$, $n1$, $K_{ЦАП\max}$ и $K_{ЦАП\min}$. Отбираются возможные для реализации варианты частотного плана, для которых коэффициенты передачи ЦАП $K_{ЦАП}$ не равняются нулю, с параметрами $\overline{n1}$, $\overline{K_{ЦАП}}$.

5. Для возможных вариантов частотного планирования определяются основные частоты ЦАП $f_{ЦАП}(n, \overline{n1}) = f_T(\overline{n1}) \cdot \overline{K_{ЦАП}}(n, \overline{n1})$.

6. Выполняется расчет частот образов выходного сигнала ЦАП: $f_{обp}(n, \overline{n1}) = f_T(\overline{n1}) \cdot |\overline{K_{ЦАП}}(n, \overline{n1}) + n|$.

7. Формируется таблица возможных m вариантов частотного плана $Fig(n, \overline{n1}, \overline{K_{ЦАП}})$. Для каждого варианта рассчитывается максимальное значение огибающей спектра выходного сигнала $K_{огиб}$ по выражениям (2)-(7), (9), (10).

Далее варианты частотного планирования сводятся в единый массив: $S(Reglim, K_{огиб_max}, n, n1, K_{ЦАП})$, содержащий режим работы быстродействующего ЦАП, максимальное значение амплитуды, номер образа, коэффициент умножения УЧ, величину коэффициента передачи ЦАП.

В качестве примера в таблице 1 приведены наилучшие варианты частотного плана ЦАП с параметрами микросхемы AD9164 с максимальными коэффициента-

ми эффективного преобразования.

Таблица 1 – Лучшие варианты реализации частотного планирования гипотетического ЦАП AD9164 при $f_{ГОЧ} = 100$ МГц и $f_{обр} = 8950$ МГц

Вариант реализации	$n1$	$K_{ЦАП}$	$f_T = f_{ГОЧ} \cdot n1$, ГГц	$f_{ЦАП} = f_T \cdot K_{ЦАП}$, ГГц	Номер образа n	$f_{обр} = f_T \cdot K_{ЦАП} + n $, ГГц	Режим работы	$K_{эфф}$
0	19	0,2895	1,9	0,45	–5	8,95	RFZ4	3,714
1	24	0,2708	2,4	0,8	–4	8,95	RFZ3	4,910
14	28	0,1964	2,8	0,55	3	8,95	RFZ4	5,055
15	21	0,2619	2,1	0,55	4	8,95	RFZ3	5,062

Зависимости СПМ фазовых шумов для лучших режимов работы RFZ3 и RFZ4 приведены на рисунке 7.

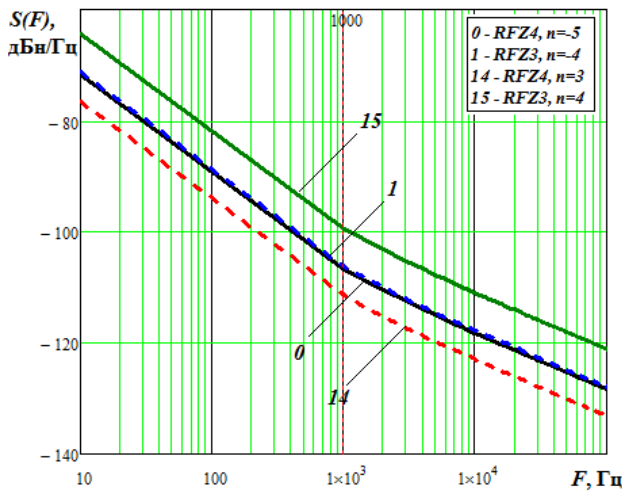


Рисунок 7 – СПМ фазовых шумов ЦАП с параметрами AD9164 при $f_{ГОЧ} = 100$ МГц и $f_{обр} = 8950$ МГц

Предложена и исследована схема гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП, защищенная патентом на полезную модель №214526 — рисунок 8. В данной схеме ЦАП работает в специальных режимах работы и использует образы основной частоты для повышения частоты генератора подставки.

Для моделирования шумовых характеристик гибридного синтезатора использованы математические модели СПМ фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи и разработанные модели шумовых характеристик быстродействующих ЦАП с использованием образов основной частоты:

$$S_{ГЧ}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДЧ1}(F) + \frac{S_{ЧФД}(F)}{E_{ЧФД}^2} + S_{ДЧ2}(F) + \frac{1}{N_2^2} \left[S_{СМ}(F) + |n + K_{ЦАП-обр}|^2 \times \right. \right. \quad (14)$$

$$\left. \left. \times (S_{ГОЧ}(F)n_1^2 + S_{УЧ}(F)) + S_{ЦАП-обр}(F) \right] \cdot N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{ГВН}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2 \right],$$

где символами S обозначены СПМ фазовых шумов соответствующих звеньев на

рисунке 8, $H_{31}(F) = \frac{H(F)}{1+H(F)}$ и $H_{32}(F) = \frac{1}{1+H(F)}$ – передаточные функции замкнутого

кольца ФАПЧ по внешним и внутренним шумам, $H(F) = \frac{K_{ФНЧ}(F)K_0}{pN_2}$ – передаточ-

ная функция разомкнутого кольца ФАПЧ, $K_{\Phi\text{НЧ}}(F)$ – передаточная функция ФНЧ, $K_0 = s_{\text{ГУН}} E_{\text{чФД}}$ – коэффициент усиления разомкнутой системы, $s_{\text{ГУН}}$ – крутизна характеристики ГУН, $E_{\text{чФД}}$ – максимальное выходное напряжение ФД, p – оператор Лапласа.

В качестве модели ФАПЧ использовался синтезатор частот с дробным коэффициентом деления и встроенным генератором, управляемым напряжением 1508MT015, ГОЧ — малощумящий кварцевый генератор ГК219-ТС с выходной частотой 100 МГц, ЦАП AD9164. Моделирование СПМ фазовых шумов проводилось для выходной частоты гибридного синтезатора $f_{\text{вых}} = 5000$ МГц.

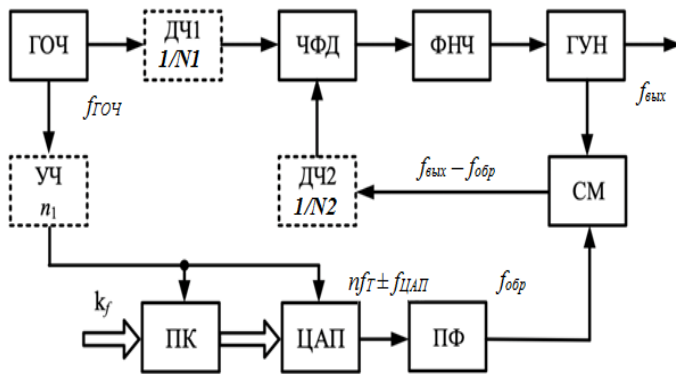


Рисунок 8 – Структурная схема гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы

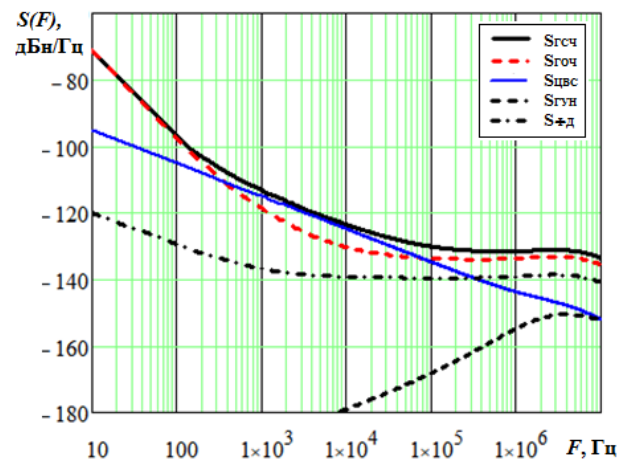


Рисунок 9 – СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП для выходной частоты 5000 МГц при $n = 3$

Для выбора специального режима работы быстродействующего ЦАП и его наилучших параметров проведено частотное планирование. На рисунке 9 представлены графики СПМ фазовых шумов (с учетом шумов звеньев синтезатора) наилучшего с точки зрения коэффициента эффективного преобразования варианта и вклады звеньев гибридного синтезатора. Рассчитанные параметры для данного варианта: режим RFZ4, $K_{\text{эфф}}=3,954$, $n=3$, $n_1=15$, $K_{\text{ЦАП}}=0,267$, $f_T=1500$ МГц.

Предложенный гибридный синтезатор на основе быстродействующего ЦАП, использующего режимы 2xNRZ и RFZ4 при $n = 3$, позволяет получить уровень фазовых шумов $-120 \dots -130$ дБн/Гц, что на 29 дБ лучше показателей

классической системы ФАПЧ с делителем частоты в кольце обратной связи. Использование предложенного автором режима RFZ4 по сравнению с режимом 2xNRZ позволило использовать пониженную тактовую частоту (1500 МГц вместо 5800 МГц) и снизить уровень СПМ фазовых шумов на 5-10 дБ.

Заключение содержит следующие результаты диссертационной работы:

1. Обоснована эффективность использования формирователей сигналов на основе быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, которые способны увеличить уровень амплитуд высокочастотных образов основной частоты путем изменения формы огибающей спектра выходного сигнала.

2. Разработаны математические модели быстродействующих ЦАП в известных специальных режимах работы 2xNRZ, RZ, RF, RFZ и RFZ2. Анализ спектров выходного сигнала ЦАП в специальных режимах показал значительное увеличение амплитуд высокочастотных образов (до 17 дБ) по сравнению с режимом работы NRZ в высших зонах Найквиста (до 12-й).

3. Разработаны математические модели быстродействующих ЦАП в двух впервые предложенных режимах работы – RFZ3 и RFZ4. Показано значительное (до 22 дБ) увеличение амплитуд образов основной частоты во 2-й, 3-й, 6-й, 7-й, 8-й, 9-й, 10-й, 11-й зонах Найквиста по сравнению с NRZ.

4. Разработаны математическая модель шумовых характеристик быстродействующих ЦАП на основной частоте и модернизированная методика определения коэффициентов модели при недостаточности экспериментальных данных, позволяющая получить математическую модель СПМ фазовых шумов в одиночной боковой полосе лишь по нескольким значениям уровня шумов для одной выходной частоты, приведенным в техническом описании ЦАП.

5. Разработаны математические модели шумовых характеристик быстродействующих ЦАП в режимах работы NRZ, 2xNRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2, RFZ3, RFZ4, позволяющие провести оценку СПМ фазовых шумов выходного сигнала на частотах образов. Математическое моделирование показало эффективность использования специальных режимов работы быстродействующих ЦАП с точки зрения уменьшения уровня фазовых шумов (выигрыш в сравнении с режимом

работы NRZ достигает 14,8 дБн/Гц в 9 зоне Найквиста).

6. Разработан алгоритм и программное обеспечение частотного планирования быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы для определения параметров ЦАП из условия минимума фазовых шумов при заданных выходной частоте (равной частоте образа) и частоте опорного генератора.

7. Предложена и исследована схема гибридного синтезатора на основе быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, защищенная патентом на полезную модель, позволяющая формировать сигнал на частоте 5000 МГц с уровнем фазовых шумов $-120...-130$ дБн/Гц, что на 29 дБ лучше показателей классической системы ФАПЧ с делителем частоты в цепи обратной связи.

В приложении представлены акты внедрения результатов, полученных в ходе диссертационного исследования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации

1. Ромашов, В. В. Математическое моделирование шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей / В. В. Ромашов, А. Н. Докторов, К. А. Якименко, Н. А. Сочнева (Жизнякова), С. Е. Матерухин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2019. – № 4 (36). – С. 52–59.

2. Ромашов, В. В. Математические модели шумовых характеристик цифро-аналоговых преобразователей / В. В. Ромашов, Л. В. Ромашова, И. Д. Грошков, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – № 2. – С. 50–57.

3. Ромашов, В. В. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя / В. В. Ромашов, К. А. Якименко, А. Н. Докторов, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – № 4 (48). – С. 51–59.

4. Ромашов, В. В. Повышение эффективности использования высших зон Найквиста при прямом цифровом синтезе высокочастотных сигналов / В. В. Ромашов, К. К. Храмов, К. А. Якименко, А. Н. Докторов, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 5. – С. 135–144.

5. Сочнева (Жизнякова), Н. А. Коэффициенты передачи фазовых шумов быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы / Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Проектирование и технология электронных средств. – 2023. – № 4. – С. 53–57.

6. Якименко, К. А. Исследование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей / К. А. Якименко, В. В. Ромашов, К. К. Храмов, А. Н. Докторов, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 11. – С. 180–191.

7. Ромашов, В. В. Сравнительный анализ шумовых характеристик формирователей высокочастотных сигналов на основе цифроаналоговых преобразователей / В. В. Ромашов, К. А. Якименко, А. Н. Докторов, И. Д. Грошков, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Вестник Приволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2024. – № 2 (62). – С. 6–16.

8. Ромашов, В. В. Оценка эффективности специальных режимов работы цифро-аналоговых преобразователей при формировании высокочастотных сигналов / В. В. Ромашов, Л. В. Ромашова, А. Н. Докторов, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2024. – № 2 (54). – С. 69–75.

Научные публикации, индексируемые в международной базе данных Scopus

9. Romashov, V. V. Application High-Speed Digital-to-Analog Converters for Direct Digital Synthesis of High-Frequency Radio Signals / V. V. Romashov, A. N. Doktorov, K. A. Yakimenko, N. A. Sochneva (Zhizniakova) // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1493. – P. 012023. – DOI: 10.1088/1742-6596/1493/1/012023.

10. Romashov, V. V. Mathematical Models of Noise Characteristics of High Speed Digital to Analog Converters of Radar Signal Generators / V. V. Romashov, L. V. Romashova, A. N. Doktorov, K. A. Yakimenko, N. A. Sochneva (Zhizniakova) // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1925. – P. 012024. – DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012024.

11. Romashov, V. V. High Speed Digital to Analogue Converters Phase Noise Modelling / V. V. Romashov, K. A. Yakimenko, A. N. Doktorov, N. A. Sochneva (Zhizniakova) // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2573, no. 1. – P. 012040. – DOI: 10.1088/1742-6596/2573/1/012040.

Патенты

12. Патент № 214526 Российская Федерация, МПК H03L 7/16 (2006.01). Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифроаналогового преобразователя в специальных режимах работы : № 2022114183 : заявл. 25.05.2022 : опубл. 02.11.2022 / Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сочнева (Жизнякова) Н.А.; заявитель ВлГУ. — 6 с. : ил.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683305 Российская Федерация. Программа математического моделирования выходного сигнала быстродействующего цифроаналогового преобразователя в специальных режимах работы NRZ, RZ, RF, RFZ: № 2022682126 : заявл. 21.11.2022 : опубл. 05.12.2022 / Докторов А.Н., Ромашов В.В., Якименко К.А., Сочнева (Жизнякова) Н.А.; заявитель ВлГУ. — 1 с.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614356 Российская Федерация. Программа математического моделирования спектральной плотности мощности фазовых шумов и джиттера синтезатора частот на основе быстродействующего цифроаналогового преобразователя: № 2024610744 : заявл. 18.01.2024 : опубл. 22.02.2024 / Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашов В.В., Сочнева (Жизнякова) Н.А.; заявитель ВлГУ. — 1 с.

Статьи в научных журналах и изданиях, рекомендованных РИНЦ

15. Сочнева (Жизнякова), Н. А. Исследование коэффициентов передачи фазового шума быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей при использовании образов основной частоты / Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Методы и устройства передачи и обработки информации. — 2019. — № 21. — С. 4–8.

16. Сочнева (Жизнякова), Н. А. Специальные режимы изменения огибающей спектра выходного сигнала быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей для прямого цифрового синтеза высокочастотных сигналов / Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Методы и устройства передачи и обработки информации. — 2021. — № 23. — С. 62–67.

17. Ромашова, Л. В. Обзор методов моделирования шумовых характеристик устройств формирования радиосигналов / Л. В. Ромашова, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Методы и устройства передачи и обработки информации. — 2021. — № 23. — С. 55–61.

18. Сочнева (Жизнякова), Н.А. Алгоритм частотного планирования быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы / Н. А. Сочнева (Жизнякова), И. С. Мотина, Л. В. Ромашова // Методы и устройства передачи и обработки ин-

формации. – 2024. – № 26. – С. 19–27.

Научные доклады в материалах научных конференций

19. Докторов, А. Н. Использование специальных режимов работы быстродействующих цифроаналоговых преобразователей для улучшения шумовых характеристик формирователей сигналов / А. Н. Докторов, С. Е. Матерухин, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике. X научно-практический семинар (Армандовские чтения) : сборник тезисов докладов. – Муром : ИПЦ МИ ВлГУ, 2019. – С. 35–36.

20. Ромашов, В. В. Применение быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей при прямом цифровом синтезе высокочастотных радиосигналов / В. В. Ромашов, А. Н. Докторов, К. А. Якименко, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром : МИ ВлГУ, 2020. – С. 297–302.

21. Ромашов, В. В. Математические модели шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей формирователей радиолокационных сигналов / В. В. Ромашов, Л. В. Ромашова, А. Н. Докторов, К. А. Якименко, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром : МИ ВлГУ, 2021. – С. 388–395.

22. Ромашов, В. В. Разработка новых режимов работы быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей для повышения эффективности прямого цифрового синтеза высокочастотных сигналов / В. В. Ромашов, К. К. Храмов, А. Н. Докторов, К. А. Якименко, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий: материалы Всероссийской конференции. – Москва, 2022. – С. 65–70.

23. Якименко, К. А. Исследование шумовых характеристик быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей и синтезаторов на их основе / К. А. Якименко, В. В. Ромашов, К. К. Храмов, А. Н. Докторов, Н. А. Сочнева (Жизнякова) // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2023. – № 5. – С. 25–26.

24. Ромашов, В. В. Сравнительный анализ специальных режимов работы быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей / В. В. Ромашов, А. Н. Докторов, К. А. Якименко, Н. А. Сочнева (Жизнякова), В. И. Лосев // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань : РГРТУ, 2023. – С. 127–134.

ЖИЗНЯКОВА Наталья Александровна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРО-
АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ
РАБОТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ С
МАЛЫМ УРОВНЕМ ФАЗОВЫХ ШУМОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.05.2026 г.

Формат 60x84 1/16. Усл. печ.л 1,0. Тираж 100 экз.

ООО «Типография»

602267, Владимирская область, г. Муром, ул. Льва Толстого, д. 27