

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Жизняковой Натальи Александровны

«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»

Представленная диссертационная работа посвящена актуальной проблеме разработки математических моделей быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) в специальных режимах работы для формирования высокочастотных сигналов с малым уровнем фазовых шумов. Исследование выполнено в рамках специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

### **Актуальность темы исследования**

В современных условиях развития радиотехнических систем, от телекоммуникаций до медицинской аппаратуры, наблюдается тенденция к повышению требований к рабочим частотам и методам передачи данных. Особое значение приобретают исследования в области миллиметрового диапазона волн, а также технологий широкополосной передачи и сложных схем модуляции. Существующие архитектуры синтеза частот имеют принципиальные ограничения: системы ФАПЧ обеспечивают высокое качество сигнала, но уступают в быстродействии, тогда как системы прямого цифрового синтеза (DDS) с быстродействующими ЦАП, хотя и обеспечивают мгновенную перестройку частоты, ограничены в максимальной частоте синтеза. Перспективным направлением развития является использование специальных режимов работы быстродействующих

ЦАП, позволяющих формировать высокочастотные сигналы с использованием образов основной частоты в высших зонах Найквиста. Это открывает возможности для создания формирователей сигналов с повышенными частотными характеристиками при сохранении низкого уровня фазовых шумов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки экспериментально подтвержденных математических моделей быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, позволяющихкратно увеличить выходную частоту формируемого сигнала при сохранении высокого качества радиосигнала.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы (содержащего 110 наименований, в том числе 31 работу автора) и приложений, включающих акты внедрения, патент на полезную модель и свидетельства о регистрации программного продукта.

*В первой главе* диссертации автор проводит анализ существующих методов повышения выходной частоты цифровых формирователей высокочастотных сигналов, показывает фундаментальные ограничения современных архитектур синтеза частот. Выявлены ключевые проблемы существующих методов и сформулированы задачи исследования. Особое внимание уделено анализу специальных режимов работы ЦАП, позволяющих увеличить амплитуды образов в высших зонах Найквиста. Автором обосновано, что 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* автором разработаны математические модели быстродействующих ЦАП для формирования радиосигналов

с использованием образов основной частоты. Проведено исследование спектров выходного сигнала для режимов NRZ, 2xNRZ, RZ, RF, RFZ, RFZ2. Автором предложены новые специальные режимы RFZ3 и RFZ4, обеспечивающие увеличение амплитуд образов в высших зонах Найквиста на 10-22 дБ. Доказано, что применение специальных режимов позволяет формировать высокочастотный радиосигнал с повышенной амплитудой образов в зонах 6-11 при пониженном уровне фазовых шумов (на 14,8 дБ в 8 зоне Найквиста в сравнении с режимом NRZ). Автором установлено, что разработанные модели адекватно описывают поведение быстродействующих ЦАП в различных режимах работы.

*В третьей главе* автором разработаны математические модели шумовых характеристик быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы. Предложена модернизированная методика определения коэффициентов модели при недостатке экспериментальных данных. Проведён комплексный анализ шумовых характеристик для всех режимов работы, включая новые режимы RFZ3 и RFZ4. Экспериментально подтверждено, что разработанные модели позволяют с высокой точностью оценивать уровень шумов выходного сигнала на этапе проектирования. Предложенная автором методика определения коэффициентов модели обеспечивает погрешность не более 2-3 дБ.

*В четвертой главе* 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. Автором 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.

**Научная новизна диссертации заключается в следующем:**

1. автором 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. автором 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);
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 значимость диссертационного исследования** заключается в разработке математических моделей быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в специальных режимах работы, которые позволяют формировать высокочастотные сигналы с использованием копий спектра в высших зонах Найквиста. Особую ценность представляют предложенные новые режимы работы RFZ3 и RFZ4, позволяющие достигать повышенных амплитуд образов в 6-11 зонах Найквиста, а также разработанные модели шумовых характеристик быстродействующих ЦАП в специальных режимах работы, которые дают возможность с высокой степенью точности провести оценку уровня шумов выходного сигнала на этапе проектирования.

**Практическая значимость диссертационного исследования**

заключается в создании эффективных инструментов для проектирования современных формирователей сигналов. Разработанный алгоритм частотного планирования обеспечивает оптимизацию параметров ЦАП для достижения минимального уровня фазовых шумов. Предложенная схема гибридного синтезатора демонстрирует существенное снижение спектральной плотности фазовых шумов на 29–44 дБ по сравнению с классической системой ФАПЧ с делителем частоты в цепи обратной связи.

Результаты исследования успешно внедрены в научно-исследовательскую деятельность и производственный процесс, что подтверждается актами внедрения АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов» и кафедры радиотехники МИ ВлГУ. Практическая ценность работы дополнительно подтверждается защитой патента на полезную модель и регистрацией программных продуктов. Разработанные методики позволяют проводить точную оценку уровня шумов выходного сигнала на этапе проектирования, что существенно повышает эффективность разработки радиотехнических систем. Материалы диссертации опубликованы в 24 научных работах, включая 8 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 4 статьи в журналах РИНЦ, 3 статьи в сборниках трудов, индексируемых Scopus, а также 6 тезисов докладов на международных и всероссийских научно-практических конференциях. Научно-технический уровень исследования подтвержден получением патента на полезную модель и двух свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, что свидетельствует о высокой научной и практической значимости полученных результатов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В работе предложены два новых режима RFZ3 и RFZ4. Насколько мне известно, похожие попытки модификации последовательности тактовых импульсов предпринимались в зарубежных исследованиях, но автор приводит их впервые. В порядке дискуссии: чем обоснован выбор именно восьми импульсов на периоде восстановления (рисунок 2.4.1)? Были ли

рассмотрены конфигурации с другим количеством разнополярных импульсов и почему они оказались менее эффективными?

2. В таблицах 2.3.1–2.3.3 приведены уровни амплитуд образов для трёх значений КЦАП (0,1; 0,25; 0,35). Выбор этих значений поясняется условием  $0,15 \leq \text{КЦАП} \leq 0,35$ , обеспечивающим наилучшую фильтрацию. Однако в режимах работы RFZ3 и RFZ4 наблюдается значительный выигрыш для  $n = -4$  и  $n = 4$  (8–9 зоны Найквиста) именно при КЦАП = 0,25. Планируется ли расширение диапазона КЦАП для этих режимов, и не приведёт ли это к ещё большему выигрышу в амплитуде?

3. В разделе 4.4 приведены результаты моделирования гибридного синтезатора с использованием ЦАП в режимах 2xNRZ и RFZ4. Получен существенный выигрыш по уровню фазовых шумов (29–44 дБ) по сравнению с классической ФАПЧ. Однако в модели использовались шумовые характеристики конкретных микросхем (ГОЧ ГК219-ТС, ГУН 1508MT015). Насколько чувствительны полученные результаты к замене этих компонентов на аналоги с худшими/лучшими шумовыми параметрами? Можно ли говорить о принципиальном преимуществе схемы или оно достигнуто за счёт выбора высококачественных компонентов?

4. В работе предложен алгоритм частотного планирования быстродействующих ЦАП. Чем обоснован выбор критериев оптимизации в данном алгоритме? Учитывалась ли при поиске оптимальных соотношений частот необходимость подавления побочных комбинационных составляющих, способных попасть в рабочий канал?

Следует отметить, что высказанные замечания носят дискуссионный характер и не влияют на общую высокую оценку представленного исследования. Они адресованы соискателю в качестве пожеланий для развития тематики в будущем.

### **Заключение**

Представленная Жизняковой Натальей Александровной работа квалифицируется как законченное научное исследование, решающее

актуальную задачу повышения эффективности устройств формирования высокочастотных сигналов.

Автореферат написан в полном соответствии с основными положениями диссертации. Достоверность и значимость полученных выводов подтверждаются перечнем публикаций: 24 работы, среди которых 8 статей в журналах из перечня ВАК, 3 публикации в изданиях, индексируемых Scopus, а также патент на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Жизнякова Наталья Александровна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Официальный оппонент:

Начальник отдела Всероссийского научно-исследовательского Института радиотехники (АО «ВНИИРТ»),  
кандидат технических наук



Королев Алексей Владимирович

« 20 » 08 2026 г.

Подпись Королева А.В. удостоверяю,  
ученый секретарь диссертационного  
совета Д 99.1.022.03, кандидат  
технических наук, доцент

Кожевников Д.А.

Россия, 105082 г. Москва, ул. Б.Почтовая, 22  
Тел. +7(499)267-66-04  
E-mail: vniirt@vniirt.ru