

## ОТЗЫВ

**официального оппонента Прохорова Ивана Сергеевича**

на диссертационную работу Якименко Кирилла Александровича «Гибридные синтезаторы частот с низким уровнем фазовых шумов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**Актуальность темы диссертационной работы.** Синтезаторы частот используются в качестве источников высокостабильных сигналов в системах связи, телевидения, радиолокации, радионавигации, в контрольно-измерительной аппаратуре и других радиосистемах. Развитие уровня техники требует от синтезаторов частот расширения диапазона формируемых частот, уменьшения шага перестройки, улучшения спектральных и шумовых характеристик выходного сигнала, а также уменьшения массогабаритных показателей и энергопотребления.

Гибридные синтезаторы частот, представляющие собой комбинации прямого цифрового и косвенного методов синтеза, формируют широкий диапазон частот с малым шагом сетки, а также обеспечивают малое количество и невысокий уровень (по сравнению с синтезаторами прямого цифрового метода синтеза) нежелательных спектральных компонентов выходного сигнала. За счет отмеченных достоинств гибридные синтезаторы активно используются в различных приложениях. Тем не менее, задача снижения уровня фазовых шумов таких синтезаторов недостаточно проработана в современной литературе и **является актуальной.**

Диссертационная работа Якименко К.А. направлена на решение данной проблемы. Соискатель разрабатывает математический аппарат для моделирования шумовых характеристик четырех типов гибридных синтезаторов на основе цифровых вычислительных синтезаторов и системы фазовой автоподстройки частоты и исследует с его помощью вклады составных звеньев гибридных синтезаторов в результирующий уровень

фазовых шумов. В целях снижения уровня фазовых шумов соискатель предлагает использовать копии спектра основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов для увеличения частоты сигнала смещения, подаваемого на смеситель. За счет этого уменьшается значение коэффициента деления в цепи обратной связи, от которого напрямую зависит уровень фазовых шумов.

**Научная новизна результатов диссертационной работы.** В рамках работы соискателем получены следующие новые научные результаты:

1. Экспериментально подтвержденные математические модели спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридных синтезаторов частот, позволяющие провести моделирование шумовых характеристик для различных опорных и выходных частот (глава 2).

2. Структурная схема гибридного синтезатора частот, в котором для снижения уровня фазовых шумов используются копии спектра основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов (глава 3, параграф 3.1).

3. Математическая модель спектральной плотности мощности фазовых шумов гибридного синтезатора частот, использующего копии спектра основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов (глава 3, параграф 3.2).

4. Алгоритмы частотного планирования предложенных гибридных синтезаторов, позволяющие определять все комбинации параметров (коэффициенты деления, умножения, номера используемых копий спектра, коэффициенты передачи цифровых вычислительных синтезаторов) и выбрать те, при которых обеспечивается наименьший уровень фазовых шумов (глава 3, параграфы 3.1, 3.3).

**Практическая значимость.** Вопросам практической реализации полученных теоретических результатов посвящена 4 глава диссертации. Основными практически значимыми результатами являются:

1. Структурная схема широкодиапазонного малозумящего гетеродина, который в соответствии с результатами моделирования обладает

существенно меньшим уровнем фазовых шумов (на 18 дБ) по сравнению с гетеродинами, использующимися в анализаторах спектра СК4-БЕЛАН.

2. Инструментальное средство в виде комплекса программ, предназначенное для проектирования гибридных синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик.

3. Практической значимостью обладает также разработанный автором универсальный стенд, реализованный на современных интегральных микросхемах AD9910 и ADF4113HV для экспериментального подтверждения теоретических результатов моделирования шумовых характеристик гибридных синтезаторов (глава 2, параграф 2.3).

**Достоверность полученных результатов и обоснованность положений, выносимых на защиту.** Все полученные в диссертации результаты достоверны, что подтверждается подробным анализом литературы (глава 1), проведением натуральных экспериментов. Основные положения, выносимые на защиту, четко сформулированы, полученные в работе результаты доказывают их истинность.

**Структура и содержание диссертационной работы и автореферата.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и приложения. Объем составляет 158 страниц. Диссертация содержит 67 рисунков и 19 таблиц. Тема и содержание работы соответствуют заявленной научной специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». Диссертация и автореферат написаны научным стилем с последовательным и аргументированным изложением материала. Автореферат соответствует диссертации, содержит полную информацию о методах исследований и полученных результатах.

**Публикации и апробация результатов диссертационной работы.** Основные положения диссертационной работы опубликованы соискателем в 30 работах, из которых 6 статей в научных журналах из списка ВАК, 3 статьи, индексируемые Scopus, 14 тезисов докладов. Результаты

диссертации в достаточной степени докладывались и обсуждались на научных конференциях.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Результаты диссертации Якименко К.А. внедрены в исследования по НИОКР при разработке формирователей сигналов для радиосистем на АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов» (корпорация «Алмаз-Антей»), использовались в учебном процессе кафедры радиотехники Муромского института ВлГУ при проведении занятий по курсу «Цифровые синтезаторы частот» (внедрение подтверждается актами); использованы при выполнении работ по полученным соискателем грантам (грант администрации Владимирской области (2015 г.) и грант РФФИ (2016-2017 гг.)).

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Не аргументировано высказывание о необходимости разработки и применения гетеродинов с малым шагом перестройки частоты до долей Гц (не показаны области их использования).

2. Мало внимания уделено вопросу необходимости уменьшения времени перестройки частоты рассматриваемых гетеродинов в ряде радиотехнических задач, в том числе и на примере возможной замены гетеродина анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240 на предлагаемый, использующий образы основной частоты цифрового вычислительного синтезатора.

3. При перестройке гетеродинов, использующих образы основной частоты цифрового вычислительного синтезатора, в широкой полосе частот появляется вопрос схемотехнической реализации элементов фильтрации, пути решения которого в исследовании описаны не достаточно подробно.

4. В работе не рассмотрены вопросы схемотехнического проектирования предлагаемых схем синтезаторов для устранения взаимного влияния каскадов и подавления внешних дестабилизирующих факторов, что особенно актуально для указанных соискателем частот СВЧ диапазона порядка единиц ГГц.

Следует отметить, что работа выполнена на высоком уровне, представленные замечания не являются критическими и не снижают теоретической и практической значимости работы.

**Заключение.** Диссертационная работа «Гибридные синтезаторы частот с низким уровнем фазовых шумов» является законченной научной работой, в которой решена актуальная в научном и практическом планах задача снижения уровня фазовых шумов гибридных синтезаторов частот, *соответствует* требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Якименко Кирилл Александрович *заслуживает* присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

#### **Официальный оппонент**

кандидат технических наук,  
начальник сектора ОАО «Владимирское  
конструкторское бюро радиосвязи»,  
600009, г. Владимир, ул. Батурина, 28.  
тел.: (4922) 47-87-26

*Проу*

И.С. Прохоров  
27.04.2018 г.

#### **Подпись И.С. Прохорова удостоверяю**

начальник отдела кадров  
ОАО «Владимирское конструкторское  
бюро радиосвязи»



*Хазова*

О.А. Хазова  
27.04.2018