

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора кафедры СМ-5 «Автономные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана Сидоркиной Юлии Анатольевны на диссертационную работу Алексеева Георгия Алексеевича на тему «Синхронные устройства формирования и приема сигналов цифровых систем передачи информации», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

### **Актуальность темы исследования**

Целью диссертационной работы Алексеева Г.А. является улучшение динамических характеристик синхронных устройств формирования и приема сигналов за счет структурной оптимизации системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) по быстродействию и создания на ее основе высокоскоростных синхронных модуляторов и демодуляторов BPSK и QPSK сигналов, а также структуры широкодиапазонного синтезатора частоты.

Рассматриваемый в диссертации подход к разработке радиотехнических цифровых систем передачи информации (ЦСПИ) заключается в обработке сигналов (процессы модуляции и демодуляции) непосредственно на рабочих частотах СВЧ диапазона синхронными устройствами формирования и приема, выполненными на основе систем фазовой автоподстройки частоты. Примером таких устройств могут служить микросхемы СВЧ синтезаторов частот косвенного метода синтеза на основе системы импульсной ФАПЧ (ИФАПЧ), обладающие функцией формирования модулированных сигналов на рабочей частоте. Благодаря такому подходу должно обеспечиваться высокое качество спектра синтезированного сигнала и удовлетворение современным требованиям к высокой скорости передачи информации и широкополосной скоростной перестройке частоты сигнала.

Однако актуальной проблемой остается недостаточное быстродействие существующих в настоящее время синхронных устройств в режиме начальной синхронизации в условиях значительных начальных частотных расстройек, многократно превышающих коэффициент петлевого усиления системы



$|\Delta\omega_{\text{нач}}| \gg K_{\text{ФАПЧ}}$ . Поэтому решаемые в диссертационной работе задачи существенного улучшения динамических характеристик синхронных устройств формирования и приема сигналов ЦСПИ являются актуальными и имеющими высокое прикладное значение.

### Структура диссертационной работы

*В первой главе* диссертантом рассмотрены вопросы применения синхронных методов на основе фазовой автоподстройки частоты для формирования и приема сигналов непосредственно в СВЧ диапазоне на несущей частоте. Рассмотрена структура системы ФАПЧ, принципы ее функционирования в режимах начальной синхронизации и синхронной работы, проблема недостаточного быстродействия в режиме начальной синхронизации при значительных частотных расстройках. Представлен обзор существующих решений задачи синтеза системы ФАПЧ оптимальной по быстродействию переходного режима, рассмотрены известные методы аддитивного захвата частоты применяемые совместно с ФАПЧ.

*Во второй главе* на основе аналитических методов фазового пространства предложена методика оптимизации фазового портрета системы ФАПЧ, при которой достигается линеаризация траекторий движения изображающей точки системы для случаев  $|\Delta\omega_{\text{нач}}| \gg K_{\text{ФАПЧ}}$ . Представлены синтезированные алгоритм и структура глобально линеаризованной система синхронизации (ГЛСС) обладающей линеаризованным фазовым портретом.

*В третьей главе* описываются методики разработки на основе ГЛСС устройств модуляции и демодуляции BPSK, QPSK сигналов. Представлены разработанные алгоритмы и соответствующие им структуры модуляторов, демодуляторов и синтезатора частоты. Модуляция формируемых сигналов достигается путем высокоскоростного смещения состояния ГЛСС между точками устойчивого равновесия на фазовом портрете. Демодуляция реализуется с помощью методов компенсации влияния информационной манипуляции фазы во входном сигнале на колебание опорного генератора в составе ГЛСС.

*В четвертой главе* поэтапно описан процесс получения аналитического

выражения для оценки времени синхронизации ГЛСС по частоте. Составлена методика расчета параметров устройств ГЛСС.

*Пятая глава* посвящена экспериментальным исследованиям на имитационных моделях Simulink среды MATLAB. Представлены результаты сравнительных исследований с существующими аналогами разработанных устройств – ГЛСС, демодулятора BPSK, синтезатора частоты. Приведены результаты моделирования модуляторов BPSK и QPSK сигналов, данные спектрального анализа синтезатора частоты ГЛСС.

**Научная новизна** диссертационной работы заключена в полученных в ходе исследований новых научных результатах:

- Предложена методика оптимизации по скорости начальной синхронизации системы ФАПЧ, основанная на линеаризации траекторий ее фазового портрета при относительных начальных частотных расстройках  $\gamma_{\text{нач}} \gg 1$  (где  $\gamma_{\text{нач}} = \Delta\omega_{\text{нач}} / K_{\text{ФАПЧ}}$ ).
- Получены алгоритмы оптимизированной системы в виде дифференциального уравнения связи между текущим фазовым рассогласованием  $\Delta\phi$  и его производной  $d(\Delta\phi) / dt$ . Предложена реализация алгоритмов в виде структуры глобально линеаризованной системы синхронизации (ГЛСС).
- Разработаны новые алгоритмы и структуры оптимизированных по скорости начальной синхронизации и основанных на ГЛСС синхронных модуляторов и демодуляторов BPSK и QPSK сигналов, а также синтезатора частоты косвенного метода синтеза.
- Получено аналитическое выражение для оценки времени частотной синхронизации ГЛСС, а также сформирована методика расчета параметров структур на основе ГЛСС.
- Получены результаты исследований характеристик новых структур в сравнении с традиционными аналогами на разработанных имитационных моделях Simulink.

**Практическая ценность результатов** заключается в следующем:

1. Разработанные в диссертации устройства, в соответствии с представлен-



ными результатами обладают значительно повышенной скоростью начальной синхронизации относительно существующих аналогов. В частности, на основе полученных данных имитационного моделирования показано что:

- ГЛСС превосходит по скорости начальной синхронизации систему ИФАПЧ в 5 раз при  $\gamma_{\text{нач}} = 200$ , в 62 раза при  $\gamma_{\text{нач}} = 3000$ ;
- демодулятор BPSK-GLSS превосходит по скорости начальной синхронизации демодулятор BPSK Костаса на основе обычной ФАПЧ примерно в 30 раз при  $\gamma_{\text{нач}} = 5$ ;
- синтезатор ГЛСС превосходит по скорости перестройки частоты синтезатор частоты ИФАПЧ с накачкой заряда в 4,5 раза при  $\gamma_{\text{д}} = 201$  и в 9 раз при  $\gamma_{\text{д}} = 402$ .

2. Разработанные устройства применимы для работы в СВЧ диапазоне в условиях высоких скоростей передачи информации и быстрой перестройки частоты. Это подтверждено результатами имитационного моделирования:

- основанных на ГЛСС структур модуляторов сигналов BPSK, QPSK формирующих сигналы непосредственно на несущих частотах 3,2 и 6,4 ГГц со скоростью манипуляции 300Мбит/с;
- синтезатора частоты ГЛСС с дискретной перестройкой выходной частоты ГУН вплоть до октавы в диапазоне 3,2-6,4ГГц с минимальным временем октавной перестройки на уровне  $1 \div 10$  микросекунд.

3. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены на предприятии «НИИМА «ПРОГРЕСС» в ходе разработки микросхемы СВЧ синтезатора частот косвенного метода синтеза.

### **Выявленные недостатки диссертационной работы**

В качестве наиболее существенных недостатков диссертационной работы нужно отметить следующие:

1. В диссертации указано, что созданные синхронные устройства предназначены для работы со скоростями порядка 1Гбит/с. В то же время, прове-

ренные на имитационных моделях скорости существенно ниже: формирование BPSK, QPSK сигналов осуществлялось при 300 Мбит/с.

2. В работе отсутствуют результаты исследований вопросов демодуляции сигналов на высоких скоростях передачи в СВЧ диапазоне частот.
3. Отсутствуют данные по модуляции/демодуляции с одновременной перестройкой значений несущей частоты.
4. Не рассмотрена проблема тактовой синхронизации. Каким образом она будет обеспечиваться при квазикогерентном приеме сигналов непосредственно в СВЧ диапазоне?

Указанные недостатки не снижают ценности диссертационной работы. Структура материалов работы обладает внутренней логикой, работа имеет серьезную методологическую и научную основу. Результаты, полученные в работе, обладают научной новизной и в тоже время имеют прикладную направленность по актуальной теме. Положения диссертации, выносимые на защиту, корректно сформулированы. Поставленные цель и задачи диссертационной работы успешно достигнуты.

Достоверность полученных автором результатов обеспечивается корректным применением методов анализа и синтеза, правильностью проведенных аналитических преобразований. Для получения экспериментальных данных использовалось апробированное программное обеспечение Simulink/MATLAB (Mathworks). Данные полученные на имитационных моделях верифицированы в ходе аналитического расчета, а также представленными в литературе данными полученными другими авторами.

Объем диссертации составляет 192 страницы, структура работы включает введение, пять глав, заключение, перечень литературы (129 наименований), 2 приложения. В работе содержится 104 рисунка и 24 таблицы.

По теме диссертационного исследования опубликовано 25 работ, из которых: 5 в журналах из перечня перечень ВАК, 5 индексированы в международных системах Web of Science и Scopus, 6 патентов РФ на изобретения. Опубликованные работы достаточно полно раскрывают основные результаты



диссертации.

Результаты работы были апробированы в ходе участия в 9 конференциях, в том числе международного уровня. На все разработанные структуры получены патенты РФ на изобретения.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертация Алексеева Г.А. «Синхронные устройства формирования и приема сигналов цифровых систем передачи информации» является законченной научно-исследовательской работой и содержит новые научные результаты, имеющие высокое значение для инженерной практики. Диссертация отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе, системы и устройства телевидения.

### **Официальный оппонент**

д.т.н., профессор кафедры СМ-5 «Автономные, информационные и управляющие системы» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Телефон: 8-499-2636860  
E-mail: sidyulia5968@bmstu.ru

Сидоркина Ю.А.

Личную подпись Сидоркиной Юлии Анатольевны удостоверяю

зам. директора НИИСМ  
МГТУ им Н.Э. Баумана



Борзов А.Б.

« 03 » декабря 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес организации: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Телефон: 8 (499) 263-6391

E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)