

ТИМОФЕЕВ Александр Анатольевич



ИМПУЛЬСНАЯ ФАЗОВАЯ АУТОПОДСТРОЙКА С ВЫСОКИМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

Специальность 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель: **Шахтарин Борис Ильич**,
доктор технических наук, профессор кафедры
автономных информационных и управляющих
систем МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Официальные оппоненты: **Жодзишский Марк Исаакович**, доктор технических наук, профессор, директор по исследованиям и разработкам ООО «Топкон позиционинг системс»,
Козлов Анатолий Иванович, доктор
физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет гражданской авиации».

Ведущая организация: **АО «Российские космические системы».**

Защита состоится 29 ноября 2016 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://www.bmstu.ru> и в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан ____ сентября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент



Муратов И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы

Принципы синхронизации лежат в основе технической парадигмы современного мира, они во многом определяют облик техники во всех отраслях человеческой деятельности. Современные системы передачи данных и управления, радиолокации и навигации, генерации и распределения энергии невозможно представить без подсистем синхронизации, обеспечивающих слежение за частотой и фазой опорных и информационных сигналов, оценку информационных параметров, синтез опорных и тактовых сигналов и т. д. Совершенствование этих систем имеет большое научное и практическое значение. Одной из доминирующих тенденций развития техники в постиндустриальном или информационном обществе является увеличение объемов и скорости передачи и обработки информации, что определяет новые требования к быстродействию систем синхронизации. Настоящая работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы увеличения быстродействия систем импульсной фазовой автоподстройки.

Аспекты теории систем синхронизации настолько многообразны, что трудно ограничить круг ученых, выбравших это направление исследований, в контексте настоящей работы отметим прежде всего Р. Л. Стратоновича и В. И. Тихонова, разработавших основы теории, а также ученых, внесших значительный вклад в ее развитие: В. Н. Белых, Н. М. Белова, Р. Беста, Ф. Гарднера, М. И. Жодзишского, В. А. Левина, А. В. Леньшина, В. Линдсея, В. Н. Малиновского, В. Манассевича, М. Пэррота, Г. Н. Прохладина, С. К. Романова, В. В. Сизых, Н. М. Тихомирова, В. Н. Харисова, Б. И. Шахтарина и многих других.

Вопросы синтеза частот устройствами на основе фазовой автоподстройки, в том числе импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой, рассматривались в работах Н. М. Белова, Р. Беста, Ф. Гарднера, В. А. Левина, А. В. Леньшина, В. Н. Малиновского, В. Манассевича, Г. Н. Прохладина, М. Пэррота, С. К. Романова, В. В. Сизых, Н. М. Тихомирова, Д. Н. Шапиро, Б. И. Шахтарина и других авторов. При этом

необходимо отдельно отметить особенный вклад научной школы концерна «Созвездие» (г. Воронеж), являющегося в настоящий момент ведущим предприятием России в области разработки и производства систем связи.

В последние десятилетия интенсивно проводятся исследования в области импульсных и цифровых систем синхронизации, но остаются нерешенными некоторые теоретические и практические вопросы синтеза опорных частот, функционирования быстродействующей импульсной фазовой автоподстройки (ИФАП) и цифровых систем синхронизации (ЦСС). Например, недостаточно исследовано влияние нестабильности опорного генератора на показатели качества радиотехнических систем, для синтезаторов частот с ИФАП по-прежнему актуальными остаются вопросы построения удобных аналитических моделей и практические задачи увеличения быстродействия при переключении и улучшения чистоты спектра выходного колебания, недостаточно исследованы статистические и динамические характеристики ЦСС. Относительная сложность получения и использования на практике точных аналитических моделей существенно нелинейных систем порождает потребность в разработке эффективных имитационных моделей.

Объектом исследования в диссертационной работе является система фазовой автоподстройки, **предметом исследования** – алгоритмы, структуры, математические модели и характеристики быстродействующей импульсной и цифровой фазовой автоподстройки.

Целью диссертационной работы является разработка новых алгоритмов, структур и математических моделей быстродействующей импульсной фазовой автоподстройки.

Для достижения цели в ходе научной работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние нестабильности опорного генератора приемника радиотехнической системы на качество ее работы.

2. Разработать новые алгоритмы импульсных частотно-фазовых детекторов (ИЧФД), обеспечивающих быстрое вхождение импульсной фазовой автоподстройки в синхронизм.

3. Разработать алгоритм и структуру быстродействующего синтезатора частот, обеспечивающую быстрое вхождение в синхронизм при переключениях частоты.

4. Разработать алгоритм и структуру индикатора захвата для системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором.

5. Разработать алгоритм и математическую модель системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой для петлевого фильтра произвольного порядка, учитывающую нелинейный характер ее функционирования.

6. Получить статистические и динамические характеристики цифровых систем синхронизации при наличии помех.

В настоящей работе получены **новые научные результаты**:

1. Разработаны алгоритмы импульсных частотно-фазовых детекторов с оптимизированной дискриминационной характеристикой для увеличения быстродействия синтезаторов частот с импульсной фазовой автоподстройкой и алгоритм индикатора захвата.

2. Разработана математическая модель импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой и петлевым фильтром произвольного порядка в виде системы разностных и трансцендентных уравнений, учитывающая нелинейный характер системы.

3. На основе метода припасовывания разработан алгоритм импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой и петлевым фильтром произвольного порядка.

Практическая значимость диссертационной работы

1. Разработанные новые алгоритмы импульсных частотно-фазовых детекторов, позволяют улучшить быстродействие импульсной фазовой автоподстройки с зарядовой накачкой в режиме втягивания на 30-50% относительно схемы с импульсным частотно-фазовым детектором с тремя состояниями.

2. Разработанный алгоритм быстродействующего синтезатора частот с предварительной установкой частоты исключает режим втягивания при переключении частот за счет использования априорной информации о коэффициентах деления и выработки на ее основе дополнительного управляющего воздействия.

3. Разработанный алгоритм и структура индикатора захвата для системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой обеспечивает надежное определение и индикацию режимов втягивания и удержания ИФАП.

4. Разработанный на основе математической модели алгоритм системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой и фильтром произвольного порядка позволяет проводить имитационное моделирование ИФАП с учетом нелинейностей ИЧФД и УИТ и может быть использован для решения широкого спектра задач анализа и синтеза ИФАП, начиная с вопросов устойчивости и заканчивая анализом тонкой структуры сигналов в частотной и временной областях.

5. Получены статистические и динамические характеристики цифровых систем синхронизации при наличии помех, позволяющие проводить анализ и синтез цифровых систем синхронизации.

Полученные результаты могут использоваться учеными и инженерами в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для создания быстродействующих систем импульсной фазовой автоподстройки и цифровых систем синхронизации. Они позволяют проводить аналитическое и имитационное

исследование ИФАП и ЦСС с учетом тонких нюансов их функционирования, разрабатывать новые модели на основе предложенных автором.

Используемые в диссертации **методы исследований** базируются на положениях теории автоматического управления, статистической радиотехники, теории нелинейных систем, теории Марковских процессов, теории радиотехнических цепей и сигналов, теории спектрального оценивания, теории цифровых автоматов, теории дифференциальных уравнений. Для решения поставленных задач используются методы: имитационного моделирования, решения нелинейных дифференциальных уравнений, аналитического решения дифференциальных уравнений, синтеза цифровых автоматов, структурно-параметрического синтеза, цифровой обработки сигналов, цифрового спектрального анализа.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанные алгоритмы и структуры импульсных частотно-фазовых детекторов обеспечивают сокращение времени втягивания синтезатора частот с ИФАП при вхождении в синхронизм на 30-50% по сравнению с импульсными частотно-фазовыми детекторами с тремя состояниями.

2. Структура быстродействующего синтезатора частот с предварительной установкой частоты обеспечивает полное исключение режима втягивания при переключении частот за счет использования априорной информации о коэффициентах деления в цепи обратной связи и выработки на ее основе дополнительного управляющего воздействия.

3. Алгоритм и структура индикатора захвата для системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой обеспечивает надежное определение и индикацию режимов втягивания и удержания ИФАП.

4. Математическая модель системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой в виде системы разностных и трансцендентных уравнений адекватна описываемой системе и учитывает нелинейный характер ее функционирования.

5. Статистические и динамические характеристики цифровых систем синхронизации Холмса, ЦСС Кессны и Леви в присутствии шумов на входе систем.

Достоверность полученных в ходе работы результатов подтверждается всесторонним анализом ранее выполненных работ других авторов, корректным применением апробированных научных методов, сравнением результатов, полученных путем имитационного моделирования, с аналитическими результатами, а также с результатами работ других авторов, апробацией полученных результатов на научных конференциях и в ходе научно-исследовательских работ (НИР).

Все основные результаты, представленные в диссертации, в том числе: алгоритмы и структуры быстродействующих импульсных частотно-фазовых детекторов, быстродействующего синтезатора частот с предварительной установкой частоты, индикатора захвата, математическая модель и алгоритм системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой и статистические характеристики цифровых систем синхронизации **получены автором лично**. Используемые в ходе работы результаты других авторов или полученные в соавторстве снабжены соответствующими библиографическими ссылками.

Материалы диссертации **апробированы** на семинарах кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2009, 2015), научных конференциях [4, 14], созданные автором программы используются в учебном процессе кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н. Э. Баумана, по материалам диссертации подана патентная заявка на изобретение.

Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н. Э. Баумана: учебное пособие [11], цикл лабораторных работ, что подтверждено актом об использовании.

Основные результаты диссертации **опубликованы** в 11 работах в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ [1-3, 5-10, 12, 13], учебном пособии [11], представлены в тезисах 2-х докладов на научных конференциях [4, 14], по материалам диссертации подана патентная заявка на изобретение. Материалы исследования использованы в 8-ми НИР, проведенных на кафедре автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н. Э. Баумана [15-22].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 141 наименования, приложений. Содержание работы изложено на 155 страницах машинописного текста, включая 16 страниц библиографии и 5 листов приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, проанализирована степень разработанности темы и дан обзор литературы, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель и поставлены задачи, изложена научная новизна и практическая значимость работы, выбраны методы исследований, предложены положения, выносимые на защиту, показана достоверность и приведены сведения об апробации результатов, дана общая характеристика работы.

В первой главе исследуется влияние неустойчивости опорного генератора (ОГ) приемника радиотехнической системы на качество его работы. Проанализирован состав шумов ОГ. Приведены модели шумов различных типов, произведены расчеты их параметров в зависимости от характеристик опорного генератора.

Модель шума $\delta v(t)$ в виде белого гауссовского шума с равномерной двусторонней спектральной плотностью $N_v = S_{\delta v}(0)/2$

$$\delta v(t) = \xi_v(t) \quad (1)$$

Модель шума $\delta v(t)$ в виде винеровского процесса с формирующим белым шумом N_ξ

$$\frac{d\delta v(t)}{dt} = \xi_v(t) \quad (2)$$

Модель шума $\delta v(t)$ в виде суммы частотного фликкер-шума $\zeta_v(t)$ и винеровского шума W_ξ

$$\begin{cases} \frac{dW_\xi(t)}{dt} = D + \xi_w(t) \\ \delta v(t) = W_\xi(t) + \zeta_v(t) \end{cases} \quad (3)$$

где $W_\xi(t)$ – винеровский шум;

D – коэффициент дрейфа частоты;

$\xi_w(t)$ – формирующий белый шум;

$\zeta_v(t)$ – частотный фликкер-шум.

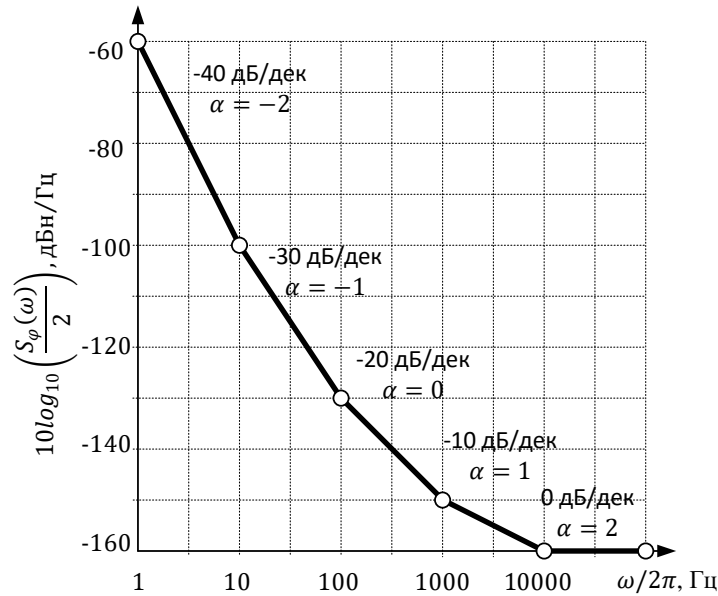


Рис. 1. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов

Произведен расчет влияния шумов опорного генератора на параметры работы радиотехнической системы для двух вариантов ОГ (ГК99-ТК и ГК118-ТС), так для флуктуаций оценки задержки в системе слежения за задержкой в установившемся режиме с дисперсией $D_{\varepsilon_\tau} = 0,0526 N_\xi / (\Delta f_{\text{ССЗ}})^3$ (с²) величина ошибки лежит в пределах $\sigma_{\varepsilon_\tau} = 0,2 \dots 2,24$ (нс) (0,06 .. 0,72 (м)), для доплеровского смещения частоты системы слежения за частотой некогерентного приемника дисперсия флуктуаций $D_{\varepsilon_f} = 0,187 f_n^2 N_\xi / \Delta f_{\text{ССЧ}}$ (Гц²) дает величину ошибки в пределах $\sigma_{\varepsilon_f} = 0,43 \dots 1,37$ (Гц) (0,08 .. 0,256 (м/с)), для

доплеровского смещения частоты системы слежения за фазой когерентного приемника $D_{\varepsilon_f} = 1,2 f_n^2 N_{\xi} / \Delta f_{\text{ССФ}}$ (Гц²) ошибка $\sigma_{\varepsilon_f} = 0,35$ (Гц) (0,065 (м/с)).

Во второй главе подробно рассмотрено устройство и функционирование всех элементов СЧ с ИФАП, проанализированы их достоинства и недостатки, разработаны имитационные модели ИЧФД, управляемого источника тока (УИТ), фильтра нижних частот (ФНЧ), управляемого генератора (УГ), сигма-дельта модулятора (СДМ), делителей с переменным (ДПКД) и дробно-переменным коэффициентами деления (ДДПКД).

Разработаны новые алгоритмы и имитационные модели ИЧФД с оптимизированной статической частотной дискриминационной характеристикой (СЧДХ), позволяющие улучшить быстродействие ИФАП с зарядовой накачкой в режиме втягивания на 30-50% относительно схемы с ИЧФД с тремя состояниями (Рис. 2).

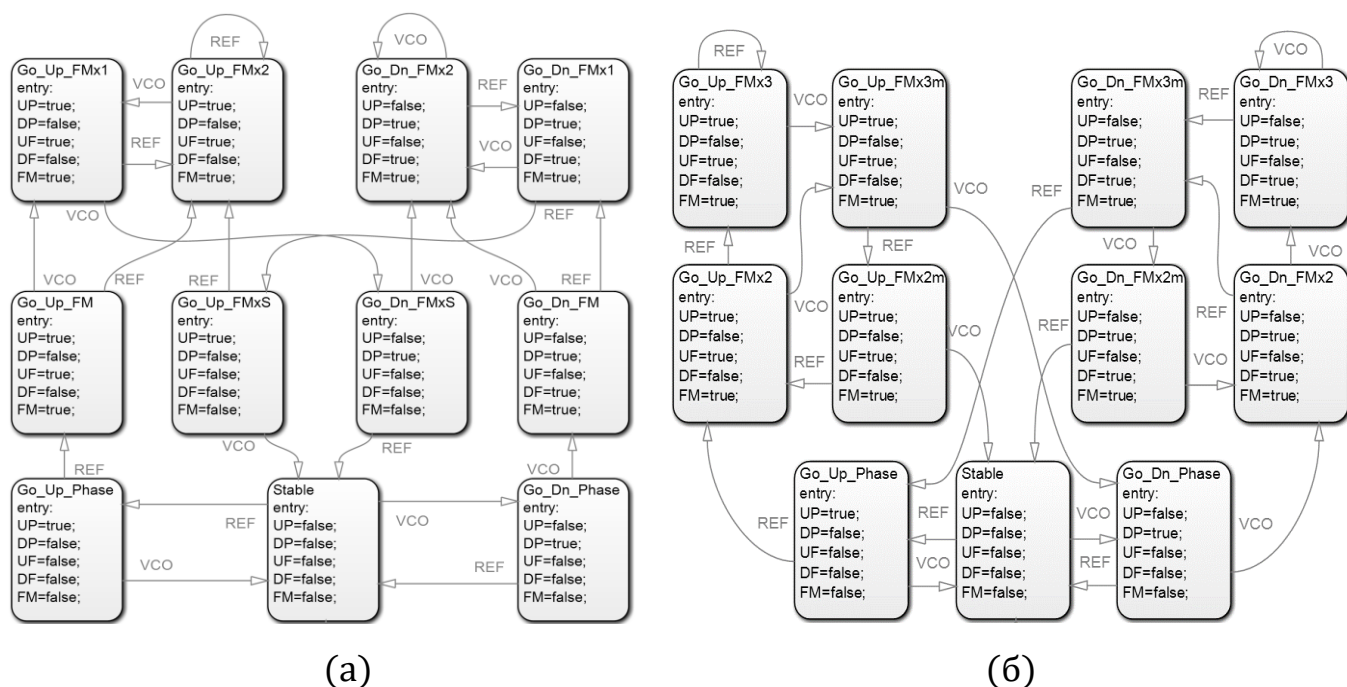


Рис. 2. Графы ИЧФД с релейной СЧДХ (а) и с релейным участком СЧДХ (б)

Разработана структура и имитационная модель быстродействующего синтезатора частот с предварительной установкой частоты, обеспечивающая полное исключение режима втягивания при переключении частот за счет использования априорной информации о коэффициентах деления в цепи обратной связи и выработки на ее основе дополнительного управляющего

воздействия (Рис. 3). Функция предварительной установки частоты выполняется регистром управляющего кодового слова (РУКС), дешифратором управляющего кодового слова (ДУКС) и сумматором-формирователем сигнала управления (СФСУ).

Разработаны имитационные модели СЧ с ИФАП для определения дискриминационных характеристик ИЧФД и исследования СДМ и переходных процессов. Проведено имитационное моделирование, в ходе которого подтверждены преимущества разработанных алгоритмов и структур.

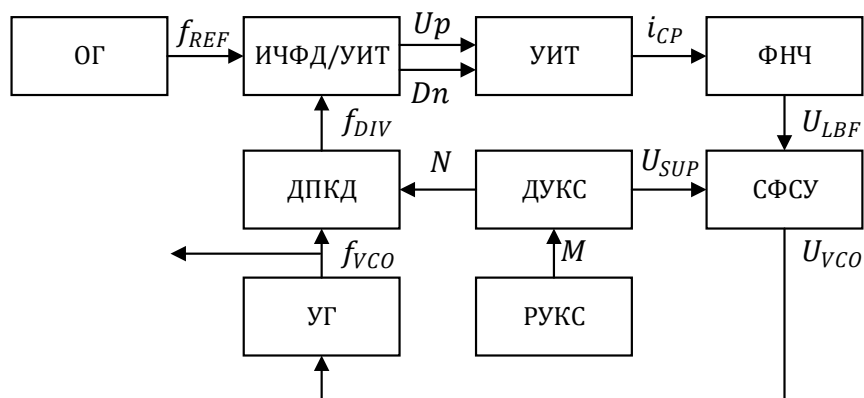


Рис. 3. СЧ с предварительной установкой частоты

В третьей главе разработана математическая модель и алгоритм ИФАП с ИЧФД с зарядовой накачкой для петлевого фильтра произвольного порядка (Рис. 4), учитывающие нелинейный характер ее функционирования, разработан алгоритм и структура индикатора захвата для ИФАП с ИЧФД, характеристики которого не зависят от частоты опорного колебания и который обеспечивает надежное определение и индикацию режимов втягивания и удержания ИФАП (Рис. 5).

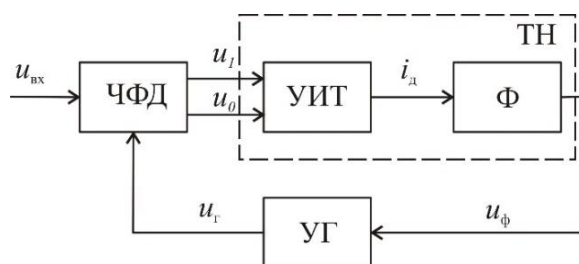


Рис. 4. Функциональная схема ФАП с ИЧФД.

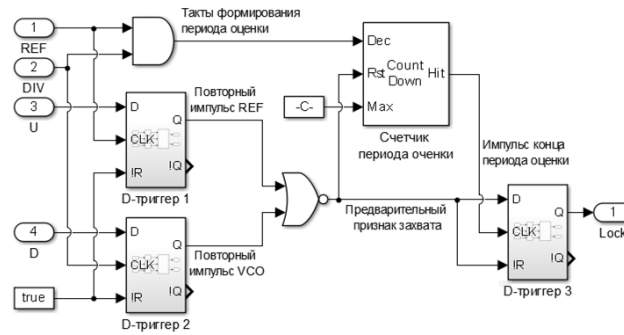


Рис. 5. Схема индикатора захвата

Получены математические модели частотно-фазового детектора с зарядовой накачкой, управляемого генератора и петлевого фильтра в виде дифференциальных уравнений в матричной форме.

Для управляемого генератора, имеющего линейную зависимость от номинальной частоты ω_0 и сигнала петлевого фильтра u_ϕ

$$\frac{d\varphi_\Gamma}{dt} = K_\Gamma u_\phi + \omega_0 \quad (4)$$

где K_Γ – чувствительность УГ, Гц/В.

Для петлевого фильтра уравнение в матричной форме

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{C}i_d, \quad (5)$$

где $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$; $x_n(t) = x(t)$; \mathbf{A} – матрица системы ДУ размерности $n \times n$; \mathbf{C} – вектор-столбец размерности $n \times 1$. Конкретный вид матрицы \mathbf{A} и вектора \mathbf{C} зависят от вида используемого линейного фильтра в контуре.

Модель ФАП для последовательно соединённых петлевого линейного фильтра и управляемого генератора, функционирование которого описывается дифференциальным уравнением (4), описывается в общем виде системой дифференциальных уравнений в матричной форме (5), решение которого на промежутке времени $[t_k; t)$ получено в форме

$$\mathbf{X}(t) = \exp[\mathbf{A}(t - t_k)]\mathbf{X}(t_k) + \int_{t_k}^t \exp[\mathbf{A}(t - \tau)] \mathbf{C}i_d(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Рассмотрены все качественно различные случаи поведения системы в зависимости от состояния детектора (значения $i_d(t_k - 0)$) и числа передних фронтов импульсов сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ на промежутке $[t_k; t_{k+1})$, методом припасовывания получен алгоритм функционирования ИФАП, учитывающий нелинейные особенности функционирования ИЧФД и УИТ. Модель может быть

использована для решения широкого спектра задач, начиная с вопросов устойчивости и заканчивая анализом тонкой структуры сигналов в частотной и временной областях.

В четвертой главе проведено исследование цифровых систем синхронизации при зашумленном входном сигнале с использованием двух подходов: математического аппарата Марковских цепей и метода статистических испытаний. Рассмотрены цифровые системы синхронизации с пошаговой коррекцией полной фазы опорного сигнала (Рис. 6), в которых изменение фазы опорного сигнала в момент коррекции осуществляется на постоянную величину.

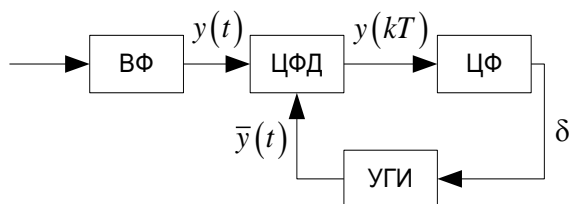


Рис. 6. Структурная схема ЦСС с пошаговой коррекцией полной фазы

Для таких систем методом математического моделирования (модель Марковской цепи) и имитационного моделирования (модели Холмса, Кессны и Леви) получены статистические и динамические характеристики: плотности распределения вероятности фазовой ошибки, дисперсия фазовой ошибки синхронизации, среднее время до первого срыва синхронизации. Показано соответствие результатов, полученных с использованием аналитических выражений, и результатов численного моделирования.

В заключении представлены основные результаты работы, подтверждено решение задач исследования и достижение поставленной цели. Определены направления будущих исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе в ходе решения актуальной научно-технической задачи увеличения быстродействия систем импульсной фазовой автоподстройки достигнуты новые научные и практические результаты:

1. Исследовано влияние нестабильности опорного генератора приемника радиотехнической системы на качество его работы.

2. Разработаны новые алгоритмы импульсных частотно-фазовых детекторов, обеспечивающих быстрое вхождение импульсной фазовой автоподстройки в синхронизм.

3. Разработаны алгоритм и структура быстродействующего синтезатора частот с предварительной установкой частоты, обеспечивающая быстрое вхождение в синхронизм при переключениях частоты за счет использования информации о коэффициентах деления в цепи обратной связи и выработки на ее основе дополнительного управляющего воздействия.

4. Разработаны алгоритм и структура индикатора захвата для системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой, характеристики которого не зависят от частоты опорного колебания и который обеспечивает надежное определение и индикацию режимов втягивания и удержания ИФАП.

5. Разработаны математическая модель и алгоритм системы импульсной фазовой автоподстройки с импульсным частотно-фазовым детектором с зарядовой накачкой для петлевого фильтра произвольного порядка, учитывающие нелинейный характер ее функционирования, в виде системы разностных и трансцендентных уравнений, основанной на описании динамики данной детерминированной системы автоматом с конечным числом состояний и системой дифференциальных уравнений.

6. Получены динамические и статистические характеристики для цифровых систем синхронизации при наличии помех с использованием моделей, построенных с помощью математического аппарата цепей Маркова.

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы были решены все поставленные задачи и достигнута цель - разработаны новые алгоритмы, структуры и математические модели быстродействующей импульсной фазовой автоподстройки. Результаты диссертационной работы апробированы, использованы в научно-исследовательских работах, имеют практическое

значение и могут быть востребованы учеными и инженерами при выполнении НИР и ОКР по разработке систем синхронизации и синтезаторов частот.

Публикации по теме диссертации

1. Шахтарин, Б. И. Оценка качества спектра выходного сигнала цифрового синтезатора прямого синтеза / Б. И. Шахтарин, В. Б. Стешенко, А. А. Тимофеев // Теория и практика применения и совершенствования радиоэлектронных систем ГА. Сборник научных трудов МГТУ ГА. – М.: Изд-во МГТУ ГА, 1996. – С. 54-63. (0,6 печ. л. / 0,2 печ. л.)
2. Шахтарин, Б. И. О срыве слежения в системах ФАП / Б. И. Шахтарин, С. В. Артюшин, А. А. Тимофеев // Научный вестник МГТУ ГА, серия "Радиофизика и радиотехника". – М.: МГТУ ГА, 1998. – № 8. – С. 53-61. (0,5 печ. л. / 0,2 печ. л.)
3. Сизых, В. В. О срыве синхронизации в системе слежения за задержкой сигнала / В. В. Сизых В. В., А. А. Тимофеев, Б. И. Шахтарин // Научный вестник МГТУ ГА, серия "Радиофизика и радиотехника". – М.: МГТУ ГА, 1998. – № 8. – С. 91-98. (0,5 печ. л. / 0,15 печ. л.)
4. Сизых, В. В. Срыв слежения в системах синхронизации / В. В. Сизых, Б. И. Шахтарин, А. А. Тимофеев, С. В. Артюшин // LIII Научная сессия РНТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. Секция «Теория информации». – М. 1998. 237 с. (0,6 печ. л. / 0,15 печ. л.)
5. Сизых, В. В. О вероятности срыва слежения фазовой автоподстройки / В. В. Сизых В. В., А. А. Тимофеев, Б. И. Шахтарин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, серия «Машиностроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – № 2. – С. 100-109. (0,6 печ. л. / 0,15 печ. л.)
6. Шахтарин, Б. И. Условия возникновения хаотичных колебаний в диссипативной ФАС с интегрирующим фильтром / Б. И. Шахтарин, А. А. Тимофеев, С. В. Голубев, Д. А. Губанов // Сборник научных трудов МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 1997. – № 5. – С. 17-30. (0,8 печ. л. / 0,4 печ. л.)

7. Тимофеев, А. А. Параметрическая оптимизация дискретной системы фазовой синхронизации второго порядка в условиях комбинированных случайных воздействий / А. А. Тимофеев, А. М. Шанин, И. М. Якимов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, серия «Приборостроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – №4. – С. 58–72. (0,8 печ. л. / 0,4 печ. л.)
8. Свиридов, В. Е. Оценка спектра выходного сигнала цифрового синтезатора частот / В. Е. Свиридов, А. А. Тимофеев, Е. А. Холопов // Научный вестник МГТУ ГА. – М. Изд-во МГТУ ГА, 2004. – №4. – С. 72-79. (0,5 печ. л. / 0,2 печ. л.)
9. Тимофеев, А. А. Применение цепей Маркова для анализа системы тактовой синхронизации, функционирующей в условиях комбинированных случайных воздействий / А. С. Александров, А. А. Тимофеев, В. А. Чвало, И. М. Якимов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Приборостроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – №3. – С. 83-95. (0,75 печ. л. / 0,2 печ. л.)
10. Самохвалов, А. А. Марковская модель цифровых систем синхронизации / А. А. Самохвалов, А. В. Кондратьев, А. А. Тимофеев // Электромагнитные волны и электронные системы. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2005. – Т. 10. – № 6. – С. 47-55. (0,5 печ. л. / 0,15 печ. л.)
11. Шахтарин, Б. И. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. Учебное пособие / Б. И. Шахтарин, Ю. А. Сидоркина, А. А. Тимофеев [и др.] – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 256 с. (16 печ. л. / 2 печ. л.)
12. Сизых, В. В. Анализ индикатора захвата системы фазовой автоподстройки с частотно-фазовым детектором / В. В. Сизых В. В., А. А. Тимофеев, Б. И. Шахтарин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, серия «Приборостроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – № 5. – С. 69-76. (0,5 печ. л. / 0,15 печ. л.)
13. Шахтарин, Б. И. Математическая модель фазовой автоподстройки с токовым детектором / Б. И. Шахтарин, А. А. Тимофеев, В. В. Сизых // Радиотехника и электроника. – М.: Наука, 2014. – Т. 59, № 10. – С. 1033-1041. (0,5 печ. л. / 0,15 печ. л.)
14. Шахтарин, Б. И. Об увеличении быстродействия синтезаторов частот с импульсной фазовой автоподстройкой / Б. И. Шахтарин, А. А. Тимофеев,

- Ю. А. Сидоркина, В. В. Сизых // IX Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: Тез. докл. – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2015. – С. 156-162. (0,4 печ. л. / 0,1 печ. л.)
15. Исследование систем синхронизации при наличии помех : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: В. В. Сизых, В. Б. Стешенко, А. А. Тимофеев [и др.]. – М., 1996. – № ГР 01.970001718.
16. Анализ систем синхронизации : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: В. В. Сизых, Ю. В. Соболев, А. А. Тимофеев [и др.]. – М., 1998. – № ГР 01.990003036.
17. Передача информации в цифровых системах связи : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: Ю. А. Сидоркина, А. А. Тимофеев, В. А. Суворов [и др.]. – М., 2000. – № ГР 02.200104560.
18. Методы анализа и синтеза цифровых радиотехнических систем : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: Ю. А. Сидоркина, А. В. Свинцов, Д. А. Святный, А. А. Тимофеев, С. Д. Юдин, Ю. В. Соболев, М. В. Башмаков [и др.]. – М., 2001. – № ГР 02.200205536.
19. Методы анализа радиотехнических систем : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: Ю. А. Сидоркина, А. В. Свинцов, Д. А. Святный, А. А. Тимофеев [и др.]. – М., 2003. – № ГР 02.200307281.
20. Анализ и синтез систем связи : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: Ю. А. Сидоркина Ю. А., А. А. Тимофеев, А. А. Быков, [и др.]. – М., 2005. – № ГР 02.200508961.
21. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: Ю. А. Сидоркина, Г. Н. Прохладин, П. И. Кобылкина, А. А. Тимофеев [и др.]. – М., 2007. – № ГР 01.200710182.
22. Помехоустойчивость и синхронизация в системах передачи информации : отчет о НИР / МГТУ им. Н. Э. Баумана; рук. Б. И. Шахтарин; исполн.: Ю. А. Сидоркина, А. А. Тимофеев [и др.]. – М., 2012. – № ГР 01.201262971