

на правах рукописи

Палей Дмитрий Эзрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИСКРЕТНЫХ  
СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНЫМ ФИЛЬТРОМ

Специальность - 05.12.01 - "Теоретические основы радиотехники"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 1998 г.

Работа выполнена в Ярославском государственном университете им. Демидова П.Г. на кафедре динамики электронных систем

Научный руководитель	- кандидат технических наук, доцент Казаков Л.Н.
Официальные оппоненты	- доктор технических наук, профессор Пестряков А.В. - кандидат технических наук, профессор Капранов М.В.
Ведущее предприятие	- конструкторское бюро «Луч», г. Рыбинск.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 199 г.  
в \_\_\_\_\_ ч. \_\_\_\_\_ мин. в аудитории \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного  
совета К-053.16.13 по присуждению ученой степени кандидата технических  
наук Московского энергетического института (технического университета).

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111250,  
Москва, Е-250, ул. Красноказарменная, д.14, Ученый Совет МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 199 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
К-053.16.13  
кандидат технических наук,  
доцент

Т.И.Курочкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Системы фазовой синхронизации (СФС) нашли в настоящее время широкое применение во многих областях радиотехники, таких как радиопередающие и радиоприемные системы, радиолокация и радионавигация, радиоизмерительная техника и т. д. В качестве примера можно привести современные цифровые радиоприемные системы, в которых с помощью СФС решается целый ряд задач. Среди них синхронизация несущих колебаний, синхронизация и демодуляция поднесущих и модулирующих колебаний, синхронизация и демодуляция двоичных символов цифровой информации, синхронизация и свертка псевдослучайной последовательности в системах связи с использованием широкополосных сигналов.

Дискретные системы фазовой синхронизации (ДСФС) в большинстве случаев составляют основу вышеперечисленных устройств. Выбором структуры колец и типов входящих в них узлов, в первую очередь, фильтров цепи управления можно создавать варианты систем, обладающие требуемыми характеристиками по точности работы, быстродействию, помехоустойчивости для различных типов входных сигналов и законов модуляции. За счет усложнения алгоритмов обработки и реализующих их устройств появляется возможность создавать гибкие алгоритмы обработки информации, оптимизации различных параметров и характеристик.

Отдельно следует сказать о системах частотного синтеза, которые строятся на основе дискретных колец фазовой синхронизации. За счет усложнения цепей управления, и соответственно алгоритмов управления можно значительно повысить эффективность этих систем, расширить их функциональные возможности. Например, наряду с традиционным применением использование колец, обладающих высокими астатическими свойствами, позволяет совместить в синтезаторе функцию синтеза высокостабильной по частоте несущей с ее угловой модуляцией. Использование различных режимов управления фильтрами, как правило нелинейными, позволяет достичь высоких характеристик синтезируемых сигналов.

Приведенные примеры говорят о том, что в настоящее время существует устойчивая тенденция расширения области применения систем фазовой синхронизации. Развитие дискретных и цифровых технологий только усиливает ее. Вместе с тем увеличение области применения, связанное в том числе и с расширением функциональных возможностей СФС, предполагает усложнение алгоритмов управления, а это напрямую связано с использованием сугубо нелинейных режимов функционирования.

Можно утверждать, что задача повышения эффективности существующих и вновь созданных типов устройств на основе дискретных СФС достаточно актуальна. Решение этой проблемы неразрывно связано с анализом нелинейных режимов систем, при котором учитываются не только нелинейные свойства фазового детектора, но и других узлов - в первую очередь фильтра нижних

частот цепи управления. При этом удачный выбор нелинейного фильтра, режима его работы позволяет не только оптимизировать динамические свойства системы, такие как область устойчивости в большом или в целом, характер движений, переходные процессы, но и придавать системе совершенно новые качества и характеристики, получение которых невозможно в системе с линейным фильтром.

Таким образом речь идет об исследовании моделей дискретных СФС, имеющих несколько нелинейностей. При этом одна из них периодическая, обусловленная фазовым детектором (синусоидальная, пилообразная, треугольная и т.д.), вторая, обусловленная нелинейными свойствами фильтра, может быть периодической, либо непериодической - ограничивающей. Периодическая (чаще пилообразная) нелинейность характерна для цифровых интегрирующих фильтров со сбросом по переполнению. Нелинейность ограничивающего типа характерна для аналоговых фильтров (например при реализации их на операционном усилителе) и цифровых с переполнением без сброса.

Необходимо отметить, что модель дискретной СФС с двумя и более нелинейностями представляет собой достаточно сложный объект исследования, практически неизученный до недавнего времени. Системы с перечисленными особенностями практически не рассмотрены в научно-технической литературе. Основные причины кроются в отсутствии достаточно развитой теории нелинейных дискретных систем.

Основы теории систем фазовой синхронизации заложены в монографиях В. В. Шахгильдяна, А. А. Ляховкина, Г. И. Тузова, в работах Б. И. Шахтарина, В. Н. Белыха, А. В. Пестрякова, М. В. Капранова, Г. А. Леонова. Теоретическим исследованиям систем с тороидальным фазовым пространством посвящены труды В. П. Пономаренко, Т.С. Федосовой.

Непосредственно исследованиям дискретных систем фазовой синхронизации с несколькими нелинейностями посвящены работы Паушкиной Т.К., Федосовой Т.С. Однако в них использованы непрерывные модели, что ограничивает область применения полученных результатов. В работах Казакова Л.Н., Широкова Ю.В. рассмотрен ряд задач по исследованию систем на основе дискретных связанных колец фазовой синхронизации, которые описываются дискретными моделями с двумя нелинейностями. В целом эти модели можно рассматривать как частный случай системы с периодическими нелинейностями.

**Целью диссертационной работы** является исследование динамики дискретных систем фазовой синхронизации второго порядка с нелинейными фильтрами в цепи управления, включая изучение общих свойств систем с фильтрами различного типа, вопросы анализа периодических и квазипериодических движений, устойчивости в большом и целом состояния синхронизма.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработка обобщенной модели импульсных и цифровых систем фазовой синхронизации с различными типами фазовых детекторов и нелинейных фильтров в цепи управления;

- разработка методики исследования и анализ периодических и квазипериодических движений в ДСФС с пилообразной характеристикой детектора с пилообразным и ограничивающим фильтром в цепи управления, включая вопросы устойчивости в большом и целом состоянии синхронизма;

- разработка методики исследования и анализ периодических и квазипериодических движений в ДСФС с синусоидальной характеристикой детектора с пилообразным и ограничивающим фильтром в цепи управления, включая вопросы устойчивости в большом и целом состоянии синхронизма;

- исследование динамических свойств ДСФС с пилообразным и ограничивающим фильтром в цепи управления при наличии шумового входного воздействия для случая синусоидальной характеристики детектора, включая вопросы статистических характеристик периодических движений, состояния синхронизма, области устойчивости в целом;

- компьютерное моделирование импульсных и цифровых систем фазовой синхронизации, исследование их динамических характеристик с учетом реального поведения отдельных узлов;

- проведение экспериментальных исследований импульсной системы фазовой синхронизации с нелинейным интегратором в цепи управления и цифрового синхронно-фазового демодулятора с квадратурным преобразователем на входе, проверка основных результатов теоретических исследований.

**Научная новизна заключается в следующем:**

- получена обобщенная модель ДСФС второго порядка с нелинейным фильтром, определены ее параметры, позволяющие легко интерпретировать результаты исследований для конкретных физических объектов;

- предложена методика нелинейного анализа дискретных систем фазовой синхронизации второго порядка с нелинейным фильтром для различных типов характеристики фазового детектора и фильтра, основанная на качественно-аналитическом анализе структуры фазового пространства;

- на основе разработанной методики и алгоритмов получены результаты нелинейного анализа дискретной СФС второго порядка с ограничивающим фильтром для пилообразной и синусоидальной характеристик детектора, включая области существования в пространстве параметров различных периодических движений, точные значения областей устойчивости в целом состоянии синхронизма, графики полосы захвата;

- на основе разработанной методики и алгоритмов получены результаты нелинейного анализа дискретной СФС второго порядка с пилообразным фильтром для пилообразной и синусоидальной характеристик фазового детектора, включая основные бифуркации периодических движений, области существования в зависимости от нелинейных свойств фильтра, области глобальной устойчивости, полосу захвата;

- получены результаты исследований статистических свойств ДСФС с синусоидальной характеристикой фазового детектора для ограничивающей и пилообразной характеристики фильтра, включая статистические области глобальной устойчивости для различных значений дисперсии входного шума;

- разработаны компьютерные модели импульсной и цифровой систем синхронизации, учитывающие свойства реальных узлов и позволяющие проводить исследования для произвольных значений параметров устройств.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в следующем:

- установлены закономерности поведения дискретных систем фазовой синхронизации с различными типами нелинейности фильтра, учет которых позволяет улучшить ряд важных показателей устройств, созданных на основе подобных систем;

- получены результаты теоретических исследований математической и компьютерной моделей для различных типов нелинейности фильтра и детектора в виде формул и графиков для инженерного расчета параметров радиотехнических устройств на основе ДСФС с нелинейным фильтром;

- в ходе выполнения работы создан комплекс программных пакетов для персонального компьютера, позволяющий исследовать и производить расчеты необходимых характеристик импульсных и цифровых систем синхронизации с нелинейным фильтром;

- в ходе выполнения работы создан программно-аппаратный комплекс, позволяющий исследовать процессы в цифровых системах и производить расчеты необходимых характеристик цифровых систем синхронизации с нелинейным фильтром;

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Обобщенная модель импульсных и цифровых СФС второго порядка с произвольной характеристикой фазового детектора и нелинейным фильтром в цепи управления.

2. Методика анализа ДСФС второго порядка с линейным фильтром для пилообразной и синусоидальной характеристик детектора. Результаты анализа обобщенной модели для данного случая, включая анализ областей существования возможных периодических движений, устойчивости в целом состояния синхронизма, графики полосы захвата.

3. Методика анализа дискретных СФС второго порядка с ограничивающим фильтром в цепи управления для пилообразной и синусоидальной характеристикой детектора. Результаты исследования обобщенной модели с данными типами нелинейностей: типы существующих в системе движений, их бифуркации и области существования в пространстве параметров, области устойчивости в целом, полоса захвата в зависимости от усиления.

4. Методика анализа дискретных СФС второго порядка с пилообразным фильтром для пилообразной и синусоидальной характеристикой детектора. Результаты, полученные при анализе обобщенной модели с данным фильтром: типы и качественные характеристики существующих в системе движений,

области устойчивости в большом и целом, полоса захвата в зависимости от параметров системы.

5. Результаты исследования ДСФС с синусоидальной характеристикой детектора и нелинейным фильтром при наличии шума на входе системы, включая сравнительный анализ статистических областей глобальной устойчивости для ДСФС с различными типами нелинейности фильтра.

6. Результаты компьютерного моделирования импульсных и цифровых СФС второго порядка с различными типами нелинейных фильтров, включая полосу захвата для импульсных и цифровых систем.

7. Результаты экспериментальных исследований лабораторных модулей импульсных и цифровых СФС второго порядка с различными типами нелинейных фильтров, включая полосу захвата. Сравнительный анализ результатов, полученных при качественно-аналитическом, компьютерном и экспериментальном исследованиях.

**Методы исследования.** Для решения перечисленных задач в диссертационной работе используются общие и прикладные методы качественной теории динамических систем и теории бифуркаций, методы анализа нелинейных разностных уравнений, теория точечных отображений, моделирование на ЭВМ.

**Апробация результатов работы.** Работа выполнялась в отраслевой научно-исследовательской лаборатории "Дискрет" в рамках ряда научно-исследовательских программ, проводимых кафедрой радиофизики Ярославского государственного университета в течение 1991-1997 г.г. по госбюджетным темам "Университеты России", "Исследование динамики дискретных и цифровых систем передачи информации". Основные результаты работы докладывались на Научно-технической конференции "Повышение качества и эффективности устройств синхронизации в системах связи" (Ярославль, 1993), Международной научно-технической конференции "Цифровая обработка сигналов" (Ярославль, 1994), The Second International Scientific School-Seminar (Nizny Novgorod, 1994), Международной научной конференции "100 - ление начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники" посвященная дню радио (Москва, 1995), Научно-техническом семинаре секции "Фазовой синхронизации" РНТО РЭС "Нелинейные свойства систем синхронизации" (С-Петербург, 1995), конференции "Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук" (Ярославль, 1995), на IV конференции "Нелинейные колебания механических систем" (Н. Новгород, сентябрь 1996), конференции "Направления развития систем и средств радиосвязи" (Воронеж, 1997), ЛП Научной сессии, посвященной дню радио РНТО РЭС (Москва, 1997), 5-th International Specialist Workshop. Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (Moskva, 1997).

По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, в том числе: 3 статьи в центральной печати, 1 доклад в материалах международной конференции по нелинейной динамике, 2 доклада в материалах Всероссийских

конференций по системам связи, 5 тезисов докладов в материалах международных конференций и семинаров, 4 тезисов докладов в материалах Всероссийских и региональных конференций и семинаров.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы. Работа содержит 125 страниц текста, 42 страницы рисунков и 8 страниц списка литературы. Список литературы включает 93 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, выполнен обзор научной и технической литературы, обоснована актуальность, сформулированы цель, основные задачи и методы исследования, дана общая характеристика рассматриваемых систем и их особенности, кратко изложено содержание работы.

**В первой главе** выполнено моделирование различных классов дискретных систем фазовой синхронизации второго порядка с нелинейным фильтром в цепи управления. Рассмотрены следующие типы широко используемых на практике ДСФС:

- цифровые системы фазовой синхронизации с многоуровневым аналого-цифровым преобразователем фазы или многоуровневым аналого-цифровым квадратурным преобразователем входного сигнала;
- импульсные системы фазовой синхронизации с детектором «выборка-запоминание» и нелинейным аналоговым фильтром в цепи управления;
- импульсно-цифровые системы фазовой синхронизации с нелинейным цифровым каналом в цепи управления.

При моделировании рассматривались следующие характеристики нелинейных фильтров: ограничивающая и пилообразная (рис. 1).

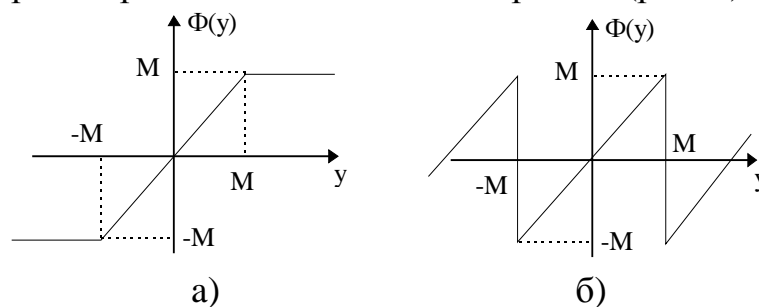


Рис. 1.

В результате моделирования показано, что математические модели всех указанных классов систем могут быть сведены к отображению второго порядка, следующего вида:

$$\begin{cases} \varphi_{n+1} = \varphi_n - \alpha F(\varphi_n) + x_n \\ x_{n+1} = g - \Phi(M, d(g - x_n) + \beta F(\varphi_n)), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi_n$  - разность фаз сигналов на входах фазового детектора в момент времени  $n$ ;  $x_n$  - нормированная разность частот входного сигнала и ПГ в момент



времени  $n$ ;  $F(\varphi)$  - характеристика фазового детектора;  $\Phi(y)$  - характеристика нелинейности фильтра;  $M$  - максимальное значение  $\Phi(y)$ ;  $\alpha, \beta, d$  - параметры системы;  $g$  - нормированная начальная расстройка.

Определены основные условия, ограничивающие применение обобщенной модели (1) для описания конкретных систем. Для цифровых систем это прежде всего конечность разрядной сетки отдельных узлов. Для импульсных СФС - это непостоянство периода дискретизации и произвольное время срабатывания (не кратное системному такту) нелинейности  $\Phi(y)$ .

Наличие единой модели позволило в дальнейшем разработать и соответственно применить общие для различных по классу систем методики и алгоритмы исследования, основанные на единых качественно-аналитических подходах. Показано, что выбор для анализа систем плоскости параметров  $(\alpha, \beta)$  при фиксированных значениях  $M, g, d$  позволяет легко интерпретировать результаты исследований в параметры и характеристики конкретных физических объектов.

**Вторая глава диссертации** посвящена анализу обобщенной модели (1) для случая пилообразной характеристики фазового детектора с различными типами фильтра в цепи управления. Исследование проведено в два этапа.

На первом этапе разработана методика исследования и рассмотрены свойства модели (1) для случая линейного фильтра. Исследована структура фазового пространства. Выделены линии  $L_{\varphi, m}$  и  $L_{x, 0}$ , являющиеся линиями отображения с сохранением координат  $\varphi \bmod 2m$  и  $x$  соответственно. Определены области линейного и нелинейного отображения  $Q_m$  (при  $m > 0$  с увеличением координаты  $\varphi$ , при  $m < 0$  с уменьшением координаты  $\varphi$ ). Найдены необходимые и достаточные условия существования периодических движений заданной структуры. На основе анализа структуры фазового пространства системы показано, что возникновение предельного цикла происходит при попадании всех его точек в соответствующие области  $Q_m$ . Соответственно разрушение цикла происходит при выходе хотя бы одной из них из соответствующей области. Найдены аналитические выражения для точки произвольного цикла, в частности показано, что вектор  $j$ -ой точки цикла некоторой структуры периода  $k$  можно представить в виде

$$\vec{q}_j = \vec{l}_j + g \vec{b},$$

где  $\vec{l}_j$  зависит от структуры цикла и выбора первой точки цикла на периоде  $F(\varphi)$ .  $\vec{b} = (E - T_L)^{-1}(0, 1)^T$  - постоянный вектор. При изменении  $g$  точки произвольного цикла, не меняя взаимного расположения, сдвигаются в фазовом пространстве вдоль вектора  $\vec{b}$ .

Построены области существования различных предельных циклов в пространстве параметров. Проанализировано их влияние на область устойчивости в целом системы. На основе проведенного анализа, для систем с линейным ПИФ ( $d < 1$ ) в цепи управления разработана эффективная методика

точного определения полосы захвата. В ее основу легло доказательство утверждения, что при выполнении условий

$$\begin{cases} \beta < \alpha(1+d) + g \\ \beta < \alpha(d-1) \end{cases}$$

с ростом  $g$  возникают первыми циклы структуры  $(1/k)$ . На основе предложенной методики получены точные зависимости полосы захвата от параметров СФС.

Для систем с линейным интегратором с форсированием показано, что пространство параметров разбито на три области, где существуют движения различных типов:

- только кратные захваты;
- только движения второго рода по координатам  $\varphi$  и  $x$  с одним нелинейным отображением;
- циклы первого и второго рода, характеризующиеся несколькими нелинейными отображениями по обеим координатам.

На втором этапе анализа, на основе данных, полученных при исследовании систем с линейным фильтром, исследованы СФС с нелинейным фильтром.

1. Изучены основные свойства СФС с ограничивающей характеристикой фильтра. В результате анализа установлено, что тип движений определяется взаимным расположением границ областей  $Q_m$  ( $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ ) и прямых  $L_{x,0}$ ,  $L_{\varphi,m}$  ( $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Показано, что состояние синхронизма существует при выполнении условий:

$$\begin{cases} M + g > \alpha \left( \frac{g(1-d)}{(1-d)\alpha + \beta} \right) \\ -M + g < \alpha \left( \frac{g(1-d)}{(1-d)\alpha + \beta} \right). \end{cases} \quad (2)$$

А при выполнении неравенства:

$$M > |\beta|/(1-d) \quad (3)$$

нелинейность  $\Phi(y)$  не влияет на установившееся в системе движение.

Описаны возможные периодические движения, их бифуркации в зависимости от параметров системы. Для каждого возможного в пределах области локальной устойчивости разбиения фазового пространства указаны типы существующих периодических движений и предельных притягивающих множеств. Получены области существования данных движений в пространстве параметров. Исследованы их бифуркации в зависимости от  $M$ . Исследован механизм возникновения-исчезновения периодических движений при изменении начальной расстройки. В частности установлено, что при незначительных  $g$  и малых  $M$  в системе существуют притягивающие множества двух типов, точки которых равномерно заполняют отрезки на границах нелинейности  $\Phi(y)$  (циклы-интервалы). Описана структура этих множеств, найдены области их существования, исследованы их бифуркации.

На основе результатов проведенного анализа получены области устойчивости в целом СФС. Установлено их увеличение при незначительном росте  $g$ . Это связано с разрушением симметрии фазового пространства, что в свою очередь приводит к исчезновению циклов первого рода. Получены графики зависимостей полосы захвата системы от коэффициента усиления в кольце.

2. Исследованы динамические свойства СФС с пилообразной характеристикой фильтра в цепи управления. Фазовое пространство этой системы является тороидальным. Выделены соответствующие области  $P_m$ , из которых происходят нелинейные отображения по координате  $x$ , прямые  $L_{x,m}$  отображения с сохранение координаты  $x \bmod 2M$ .

На основе анализа структуры фазового пространства найдены условия

$$\begin{cases} M + g < \alpha \\ M + g < 2 - \alpha \\ -M + g > -\alpha \\ -M + g > -2 + \alpha, \end{cases}$$

при которых невозможны нелинейные отображения по  $\varphi$ .

Описаны возможные периодические движения, их бифуркации в зависимости от параметров системы. В результате анализа установлено, что в данной системе существуют семейства периодических движений с одинаковым периодом. Описано взаимное расположение областей существования циклов разных семейств в пространстве параметров. Показано, что оно повторяется в пространстве параметров  $(\alpha, \beta)$  для движений лежащих на разных периодах  $\Phi(y)$ .

При анализе установлено, что в данной системе могут существовать движения, эквивалентные состоянию синхронизма ( $C_m$ ), возникновение которых обусловлено характером нелинейности фильтра. Их точки располагаются на пересечении линий  $L_{x,m}$  и  $L_{\varphi,0}$ . При нахождении системы в  $C_m$ , в отличие от основного состояния синхронизма, нелинейность фильтра успевает сработать несколько раз за одну итерацию. При этом поведение системы в окрестности  $C_m$  совпадает с поведением системы в окрестности основного состояния синхронизма. Показано, что  $C_m$  могут существовать даже при отсутствии основного состояния равновесия.

Исследована динамика изменения области глобальной устойчивости в зависимости от значения параметра  $M$ . В частности установлено, что для системы с нелинейным интегратором изменение области устойчивости в целом при изменении  $M$  качественно различно для  $M < 1$  и  $M > 1$ . На основе проведенных исследований построены графики зависимостей полосы захвата системы от коэффициента усиления в кольце.

**Третья глава диссертации** посвящена анализу обобщенной модели для случая синусоидальной характеристики фазового детектора и различных фильтра в цепи управления. Как и во второй главе, исследование проведено в два этапа.

На первом этапе рассмотрены свойства модели (1) для случая линейного фильтра. Исследована структура фазового пространства.

На основе качественно-аналитического анализа найдены области параметров, при которых в системе существуют устойчивые предельные циклы первого и второго рода. В частности получена аналитическая оценка на параметры, при которых в системе невозможны движения с постоянным убыванием или возрастанием фазы:

$$\begin{array}{ll} \text{при } \alpha > g + \beta/(1-d), & \text{если } \alpha < 1, \\ \text{при } \begin{cases} \alpha > g \frac{\beta}{(1-d)} \\ -\arccos\left(\frac{1}{\alpha}\right) + \sqrt{\alpha^2 - 1} + g + \frac{\beta}{(1-d)} < \frac{\pi}{2}, \end{cases} & \text{если } \alpha > 1. \end{array}$$

Проведен анализ устойчивости в целом стационарного состояния. Получена полоса захвата системы. Установлено, что с увеличением коэффициента усиления пропорционального канала в системе с линейным ПИФ наблюдается расширение полосы захвата при малых значениях обобщенного коэффициента усиления  $D$  и уменьшение при больших  $D$ .

Для системы с линейным интегратором найдены области существования различных периодических движения в пределах области локальной устойчивости системы. Для некоторых из них, границы этих областей получены аналитически.

На втором этапе анализа, на основе данных, полученных при исследовании систем с линейным фильтром, исследованы СФС с нелинейным фильтром.

1. Изучены основные свойства СФС с ограничивающей характеристикой фильтра. Установлено, что, как и для случая пилообразной характеристики детектора, состояние синхронизма существует при выполнении условий (2), а при выполнении неравенства (3) нелинейность  $\Phi(y)$  не влияет на установившиеся в системе движения.

Описаны возможные периодические движения, их бифуркации в зависимости от параметров системы. Получены аналитические оценки на параметры системы, при которых в СФС невозможны скольжения по фазе:

$$\begin{array}{ll} \alpha > M + g, & \text{для } \alpha < 1, \\ \begin{cases} \alpha > M + g \\ -\arccos(1/\alpha) + \sqrt{\alpha^2 - 1} + M + g < \pi/2, \end{cases} & \text{для } \alpha > 1. \end{array}$$

При анализе установлена возможность существования в системе дополнительных состояний синхронизма. Они располагаются на границах нелинейности  $\Phi(y)$ . Для существования таких движений необходимо, чтобы точки пересечения  $L_{\varphi,0}$  и границ  $\Phi(y)$  были притягивающими по координате  $x$ . Это будет выполняться для следующих условий:

$$\begin{cases} -\alpha > M + g \\ \frac{M}{\alpha} < \frac{(g - M)(1 - d)}{\beta} \end{cases}.$$

Показано, что поведение системы в окрестности этих состояний совпадает с поведением СФС первого порядка.

Проведен анализ области устойчивости в целом в зависимости от  $M$ . Установлено, что при малых  $M$  ее граница определяется двумя типами движений - циклами структуры  $(0/2)_H$ ,  $(0/1)_H$  и может быть вычислена аналитически. Найдены значения  $M$ , при которых область устойчивости в целом практически совпадает с областью локальной устойчивости. Исследовано поведение системы при больших  $M$ . Установлено, что в этом случае область устойчивости ограничивается в основном периодическими движениями, характерными для системы с линейным фильтром.

Исследованы свойства системы при отличных от нуля расстройках. Найдены качественные различия в ее поведении для различных значений  $M$ . В частности установлено, что для малых  $M$  определяющими для области устойчивости будут условия существования состояния равновесия. Для больших  $M$  она будет определяться еще и циклами второго и первого рода. Причем преобладающими являются циклы структуры  $(1/2^n)$ ,  $(0/3 \cdot 2^n)$ .

На основе проведенного анализа получены графики полосы захвата для различных параметров системы.

2. Исследованы динамические свойства СФС пилообразной характеристикой фильтра в цепи управления. Найдены области параметров системы, где нелинейные свойства фильтра не играют роли. Описаны возможные периодические движения, их бифуркации в зависимости от параметров системы.

Как и для ДСФС с пилообразной характеристикой детектора, установлено, что в данной системе существуют семейства периодических движений. Циклы одного семейства имеют одинаковый период, и разные абсолютные приращения координат  $\varphi$ ,  $x$ . Описаны основные семейства циклов, найдены области их существования в пространстве параметров  $(\alpha, \beta)$ .

Установлено, что в данной системе может одновременно существовать множество состояний синхронизма. Их координаты располагаются на пересечении линий  $L_{\varphi,0}$  и  $L_{x,m}$ . От основного эти состояния отличаются тем, что нелинейный фильтр в каждом из них за системный такт успеваает несколько раз сброситься.

Изучены возможные типы устойчивых предельных движений в системе. В частности, установлено, что устойчивые предельные множества в данной системе возникают при нелинейном продолжении неустойчивой сепаратрисы седла за границы  $\Phi(y)$ . Рассмотрены возможные типы данных множеств, найдены области их существования в пространстве параметров.

На основе проведенного анализа построены графики полосы захвата. Установлено, что в основном она ограничивается циклами второго рода по  $x$ . С этим связано ее значительное уменьшение по сравнению с системой с ограничивающим фильтром.

3. Исследованы свойства системы при наличии на входе дополнительного шумового воздействия. Численными методами получены значения

стационарной плотности вероятности для различных значений параметров системы.

Установлено, что периодические движения могут разрушаться при наличии шума. Это позволило ввести понятие статистической области глобальной устойчивости (СОГУ). Данная область определяет параметры системы, в которых среднее время до срыва состояния синхронизма не меньше заданной величины и среднее время попадания в окрестность состояния синхронизма не больше заданной величины. Исследована СОГУ в зависимости от параметров системы. Установлено, что наибольшее расширение ее по сравнению с областью глобальной устойчивости происходит в системах с пилообразным фильтром, так как в данном случае область глобальной устойчивости в основном ограничивается движениями, области притяжения которых в фазовом пространстве малы по сравнению с областью притяжения состояния синхронизма.

**В четвертой главе** проведено компьютерное моделирование импульсной и цифровой систем фазовой синхронизации с учетом особенностей режимов работы устройств и их отдельных узлов, приведены результаты экспериментальных исследований цифровой системы фазовой синхронизации на базе аппаратно-программного комплекса «цифровые системы» и лабораторного модуля синтезатора частоты на основе импульсной системы фазовой синхронизации.

С помощью разработанных компьютерных моделей импульсной и цифровой систем фазовой синхронизации с нелинейными фильтрами проведены исследования динамических характеристик системы, включая определение полосы захвата и областей существования различных периодических движений для широкого диапазона изменения параметров.

На основании полученных результатов исследования полосы захвата и динамических характеристик компьютерной модели цифровой СФС установлено практически полное совпадение с результатами теоретических исследований математической модели, рассмотренной во второй и третьей главах диссертации.

На основании полученных результатов исследования полосы захвата компьютерной модели импульсной СФС установлено качественное совпадение с данными теоретических исследований математической модели, рассмотренной во второй и третьей главах диссертации. Количественные отличия объясняются учетом в модели переменного периода дискретизации в кольце и произвольного времени срабатывания нелинейности фильтра.

Проведены экспериментальные исследования полосы захвата импульсной и цифровой СФС. В целом, установлено хорошее совпадение с результатами моделирующего алгоритма. Количественное расхождение не превышает 5%.

Проведен сравнительный анализ результатов исследований компьютерной модели, лабораторных модулей и обобщенной модели ДСФС (главы 1-3), который подтвердил совпадение основных результатов экспериментальных испытаний и аналитических исследований.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Проведено моделирование различных типов ДСФС с нелинейным фильтром в цепи управления и получена обобщенная математическая модель, наличие которой позволило разработать и применить единые для различных по классу систем методики и алгоритмы исследования, основанные на общих качественно-аналитических подходах.

2. Предложена методика нелинейного анализа дискретных систем фазовой синхронизации второго порядка с линейным фильтром, на основании которой получены результаты нелинейного анализа дискретных СФС второго порядка с пилообразной и синусоидальной характеристиками фазового детектора, включая области существования в пространстве параметров различных периодических движений, точные значения областей устойчивости в целом состояния синхронизма, графики зависимости полосы захвата от параметров системы.

3. На основе разработанной методики выполнен анализ дискретных СФС с ограничивающим фильтром для случая пилообразной и синусоидальной характеристик детектора. Исследованы общие свойства систем данного типа. Найдены условия на параметры системы, при которых область устойчивости в целом определяется условиями существования состояния равновесия и может быть вычислена аналитически. Описаны возможные периодические движения, их бифуркации в зависимости от параметров системы и влияние на область устойчивости в целом. Построены графики полосы захвата в зависимости от значений параметров системы. Показаны ее качественные изменения в зависимости от параметров нелинейного фильтра.

4. Проанализированы динамические свойства ДСФС с пилообразным фильтром для случая пилообразной и синусоидальной характеристик детектора. Исследованы общие свойства систем данного типа. Рассмотрены наиболее типичные периодические движения и их бифуркации. В пространстве параметров построены области устойчивости в целом. Исследовано их изменение в зависимости от параметров системы. Изучена зависимость полосы захвата от параметров нелинейного фильтра. Проведен сравнительный анализ областей захвата ДСФС с ограничивающим и пилообразным фильтром.

5. Разработаны компьютерные модели импульсной и цифровой систем синхронизации, учитывающие свойства реальных узлов и позволяющие проводить исследования для произвольных значений параметров устройств. Получены результаты исследований компьютерной модели и лабораторных модулей импульсных и цифровых СФС для различных типов нелинейности детектора и фильтра. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных качественно-аналитическими методами, на основе компьютерного моделирования и на основе экспериментальных исследований. По итогам

выполненных исследований предложены рекомендации по выбору параметров и режимов управления ДСФС с нелинейным фильтром, обеспечивающих наибольшие области захвата в системе.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Палей Д.Э., Казаков Л.Н. Анализ двумерного отображения системы фазовой синхронизации с двумя нелинейностями. // "Нелинейные колебания механических систем" : Тез. докладов III научн. конф. - Н. Новгород. - 1993. - С.88.

2. Палей Д.Э., Казаков Л.Н. Анализ дискретной СФС третьего порядка // Научная сессия НТОРЭС, посвященной дню радио: Тез. докладов 48 сессии. - Москва. - 1993. - С.152.

3. Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Применение многомерных точечных отображений для исследования дискретных систем фазовой синхронизации // Научно-техническая конференция "Повышение качества и эффективности устройств синхронизации в системах связи": Тез. докладов. - Ярославль. - 1993. - С.1.

4. Палей Д.Э., Казаков Л.Н. Анализ динамики дискретной СФС второго порядка // Научно-техническая конференция "Повышение качества и эффективности устройств синхронизации в системах связи": Тез. докладов. - Ярославль. - 1993. - С.42.

5. Широков Ю.В., Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Нелинейная динамика взаимосвязанных цепей с фазовым управлением (на английском языке) // "Dynamic and Stochastic Wave Phenomena": Abstracts of the Second International Scientific School-Seminar. - Nizny Novgorod. - 1994. - P.76.

6 Широков Ю.В., Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Нелинейная динамика взаимосвязанных систем фазовой синхронизации (на английском языке) // "Bifurcations and Chaos": Abstracts of the School-Conferense was supported by Ukrinian Academy of Sciences. - Kotsiveli, Ukraine. - 1994. - P.48.

7. Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Анализ полосы захвата импульсной системы фазовой синхронизации второго порядка // Радиотехника и электроника. - Т.40. № 5.- 1995. - С.823-829.

8. Палей Д.Э., Казаков Л.Н. Динамика дискретной системы второго порядка с несколькими нелинейностями // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. - № 3. - 1995. - С.61-68.

9. Палей Д.Э., Казаков Л.Н. Исследование цифровой СФС с нелинейным интегратором в цепи обратной связи. // "Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук": Тез. докладов. - Ярославль. - 1995. - С.92.

10. Казаков Л.Н., Пономарев Н.Ю., Палей Д.Э. Синтезатор частоты с улучшенными спектральными характеристиками // "Направления развития систем и средств радиосвязи": Тез. докладов научн. техн. конф. - Воронеж. - 1996. - Т.3. С. 1181-1186.



11. Палей Д.Э., Казаков Л.Н. Динамика дискретной системы фазовой синхронизации с двумя нелинейностями // "Нелинейные колебания механических систем": Тез. докладов IV научн. конф. - Н. Новгород, - 1996. - С.117.

12. Палей Д.Э. Устойчивость дискретной СФС с нелинейным фильтром при наличии шума. // "Направления развития систем и средств радиосвязи": Труды научн. техн. конф. - Воронеж. - 1997. - Т.3. С. 1269-1274.

13. Палей Д.Э. Нелинейная динамика дискретной системы фазовой синхронизации с двумя нелинейностями // Научная сессия НТОРЭС, посвященная дню радио: Тез. докладов ЛП сессии. - Москва. - 1997. - С. 137.

14. Палей Д.Э. Динамические свойства дискретной системы фазовой синхронизации с двумя нелинейностями (на английском языке) // Nonlinear Dynamics of Electronic Systems: Proceedings of 5-th International Specialist Workshop. - Moskva. - 1997. - P.63-68.

15. Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Анализ полосы захвата импульсной системы фазовой синхронизации третьего порядка с пилообразной характеристикой детектора // Радиотехника. - № 1. - 1998. - С.29-35.