

**На правах рукописи
УДК 621.396**

Казачков Леонид Николаевич

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

**Специальность: 05.12.13 – Системы и устройства
радиотехники и связи**

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва 1999

Работа выполнена в Ярославском государственном университете

Научный консультант –

Лауреат Государственной премии,
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
Доктор технических наук, профессор

Б.И.Шахтарин

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Г.А.Андреев

Доктор технических наук, профессор

А.В.Пестряков

Доктор технических наук, профессор

В.П.Сизов

Ведущая организация – НИЭМИ ПК Концерн “Антей”

Защита состоится “_____” _____ 2000 г. в “_____” час.
на заседании диссертационного совета Д.072.05.03 в Московском
государственном техническом университете гражданской авиации
(МГТУ ГА) по адресу: 125838, Москва, Кронштадтский бульвар, д.20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ ГА

Автореферат разослан “_____” _____ 1999 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 072.05.03

Кандидат технических наук,
доцент

А.С.Попов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Системы фазовой синхронизации (СФС) нашли широкое применение в технике связи и управления, радио и информационно-измерительных системах, радиолокации и навигации, системах автоматизированного контроля и т.д. Круг задач, решаемых этими системами, весьма обширен: слежение за несущими и поднесущими частотами принимаемых сигналов, когерентная демодуляция аналоговых и цифровых сигналов с частотной и фазовой модуляцией, измерение частоты и фазы сигналов, тактовая синхронизация, синтез сложных радиотехнических сигналов, синтез сетки высокостабильных частот, стабилизация частот генераторов различных диапазонов, трансформация спектра сигналов.

В последние годы интенсивно проводятся исследования в области систем фазовой синхронизации с элементами дискретизации. Переход на новые технологии существенно расширил возможности систем фазовой синхронизации и повысил эффективность устройств на их основе. Выбором структуры колец и входящих в них узлов появилась возможность создавать варианты систем, обладающих требуемыми характеристиками по точности работы, быстродействию, помехоустойчивости для различных типов входных сигналов и законов модуляции. За счет усложнения режимов работы колец стало реальностью создание гибких алгоритмов обработки информации, оптимизации параметров и характеристик.

Возможности дискретных технологий привели фактически к новым классам СФС. К числу их относятся связанные и комбинированные системы синхронизации. В состав их могут входить несколько колец фазовой синхронизации с перекрестными связями между кольцами, кольца слежения за фазой и задержкой, за фазой и частотой. Примером служат многокольцевые цифровые синхронно-фазовые демодуляторы, перекрестные связи в которых позволяют значительно поднять точность оценки отслеживаемого параметра по сравнению с однокольцевыми. Многокольцевые импульсные системы фазовой синхронизации и многокольцевые импульсно-цифровые системы частотно-фазовой автоподстройки получили большую популярность в технике частотного синтеза. Введение дополнительных связей между кольцами позволяет поднять эффективность устройств на их основе: повысить быстродействие, расширить область устойчивой работы, диапазон синтезируемых частот. С позиции классификации подобные связанные системы образуют класс систем, особенностью которого является наличие в общем случае нескольких периодов дискретизации.

К числу новых относятся дискретные системы фазовой синхронизации с циклическим прерыванием режима автоподстройки. С помощью таких систем можно эффективно решать такие задачи, как создание высокоэкономичных

синтезаторов частоты, систем многочастотного синтеза, возбудителей ЧМ и ФМ колебаний.

Дискретные системы синхронизации - существенно нелинейные системы с множеством устойчивых состояний равновесия, в общем случае, с несколькими устойчивыми периодическими и квазипериодическими движениями различных типов, со сложным, порой непредсказуемым поведением при больших расстройках по частоте. Знание характеристик таких состояний и режимов, умение управлять ими является необходимым при разработке как самих систем, так и устройств на их основе, не говоря уже об оптимизации их свойств.

Основными динамическими характеристиками СФС являются параметры и области существования состояний равновесия и других установившихся движений, области устойчивости в малом, в большом и в целом, параметры переходных процессов. Знание области параметров, в которой система устойчива в целом, решает проблему надежности ее функционирования. Обеспечение надежного функционирования в условиях устойчивости в большом за счет управления начальным либо промежуточным состоянием позволяет найти компромиссное решение при разработке систем с учетом противоречивости основных характеристик. Знание параметров переходных процессов позволяет решить проблему быстродействия.

Большинство задач по отысканию перечисленных характеристик даже применительно к традиционным однокольцевым системам второго порядка имеют в лучшем случае приближенное решение. Причина состоит в отсутствии достаточно эффективных методов исследования нелинейных разностных уравнений, описывающих анализируемые модели.

Если теория аналоговых систем синхронизации сегодня близка к завершению, то теория дискретных систем, несмотря на повышенное внимание к ней, развита существенно в меньшей степени. Большое влияние на ее оказали работы М.И.Жодзишского, В.Н.Кулешова, В.В.Шахгильдяна, А.К.Макарова, С.К.Романова, Б.И.Шахтарина, А.В.Пестрякова, В.Н.Белыха, В.П.Сизова, Г.А.Леонова, М.С.Гаврилюка, В.Линдсея, Д.Холмса, Д.Джилла, Х.Осборна, С.Гупты.

К настоящему времени детально исследованы и получены точные характеристики нелинейных режимов для дискретных систем первого порядка и в некоторых специальных случаях для автономных систем второго порядка с фиксированным периодом дискретизации. Точный анализ нелинейных режимов дискретных систем фазовой синхронизации второго и третьего порядков с различными видами нелинейностей, связанных и комбинированных систем фазовой синхронизации, систем второго порядка с циклическим прерыванием автоподстройки отсутствует.

В связи с вышеизложенным, тема диссертации, посвященная методам анализа нелинейной динамики дискретных систем фазовой синхронизации и исследованию различных классов систем с применением этих методов, является актуальной.

Цели и задачи диссертации.

Целью диссертационной работы является разработка и развитие эффективных методов анализа нелинейной динамики дискретных систем фазовой синхронизации, позволяющих проводить исследования и расчет динамических свойств широкого класса импульсных, цифровых, импульсно-цифровых, связанных многокольцевых СФС, составляющих основу перспективных систем обработки информации, генераторов сигналов с угловой модуляцией, устройств частотного синтеза и стабилизации частоты.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Построение математических моделей ряда перспективных автономных и неавтономных дискретных систем фазовой синхронизации.

2. Разработка эффективных математически обоснованных методов анализа нелинейных движений в рассматриваемых моделях, позволяющих получить простые расчетные соотношения для определения основных динамических характеристик систем.

3. Разработка на основе предложенных методов алгоритмов расчета динамических характеристик дискретных систем: областей существования установившихся движений, областей устойчивости в большом в целом, полосы захвата, параметров переходных процессов.

4. Анализ на основе разработанных методов и алгоритмов динамических режимов ряда моделей дискретных систем фазовой синхронизации: импульсных и цифровых различных порядков, двухкольцевых систем различного типа, в том числе комбинированных, систем с циклическим прерыванием автоподстройки.

5. Обоснование на основе полученных результатов анализа возможности повышения эффективности различных устройств обработки информации, генерации и стабилизации за счет применения рассматриваемых дискретных СФС.

6. Выработка рекомендаций по оптимизации динамических характеристик различных устройств, для реализации которых могут быть применены рассматриваемые дискретные СФС.

7. Демонстрация на ряде технических разработок высокостабильных генераторов ЧМ-колебаний, устройств частотного синтеза, синхронно-фазовых демодуляторов возможности повышения качественных показателей за счет использования разработанных методов анализа и реализации оригинальных технических решений.

Методы исследования.

Разрабатываемые в диссертации методы анализа нелинейной динамики дискретных СФС базируются на общих положениях качественных методов теории колебаний дискретных систем с периодическими нелинейностями,

теории бифуркаций, теории точечных отображений и метода гармонической линеаризации.

Для решения поставленных задач используются также известные разновидности метода усреднения, математическое и компьютерное моделирование, численное решение нелинейных разностных уравнений.

Разработанные методы анализа нелинейной динамики, включая качественные методы анализа на фазовом цилиндре и торе, метод гармонической линеаризации, адаптированный для анализа устойчивости новых классов систем синхронизации, ориентированы на использование персональных компьютеров.

Научная новизна результатов:

1. Получены математические модели ряда перспективных дискретных СФС, в том числе различных модификаций двухкольцевых связанных и комбинированных систем, систем с циклическим прерыванием режима автоподстройки.

2. На основе общих положений качественных методов теории нелинейных дискретных колебаний и теории бифуркаций разработаны эффективные методы анализа нелинейной динамики различных классов дискретных СФС с одной и двумя периодическими нелинейностями, в том числе неавтономных.

3. На основе общих положений метода гармонической линеаризации разработан ряд методов анализа периодических движений для СФС высокого порядка, СФС с несколькими временными дискретами и разрывным временем.

4. С учетом разработанных методов получены алгоритмы анализа основных динамических характеристик различных классов дискретных систем; алгоритмы позволяют получить расчетные соотношения для определения областей существования установившихся движений, областей устойчивости в большом и в целом как на плоскости обобщенных параметров так и на плоскости физических параметров.

5. На основе разработанных методов и алгоритмов создано оригинальное программное обеспечение для анализа динамических характеристик различных классов дискретных систем фазовой синхронизации.

6. С помощью разработанных методов и алгоритмов выполнено исследование большого количества различных типов дискретных СФС. В отношении ряда систем получены новые уточняющие результаты, позволяющие иначе подойти к их разработке (импульсные и цифровые СФС различных порядков). Ряд систем исследован впервые (различные модификации связанных двухкольцевых СФС, комбинированных систем, модификации СФС с циклическим прерыванием автоподстройки). В процессе исследований установлен ряд новых качественных особенностей дискретных СФС, связанных с процессами дискретизации и квантования, которые могут быть распространены на многие другие системы рассматриваемых классов.

Практическая ценность.

1. Разработанные в диссертации методы исследования позволили определить ряд основных динамических характеристик различных классов дискретных СФС. Получены границы существования установившихся периодических и квазипериодических процессов, границы областей устойчивой работы, зависимости полос и областей захвата от соотношений параметров систем и вида нелинейности детектора. Разработаны алгоритмы и пакеты программ для расчета динамических характеристик; созданные автором пакеты программ используются на ряде предприятий: РГАТА г. Рыбинск, МГТУ им. Баумана г. Москва, ЯрГУ г. Ярославль.

2. Разработанные программы позволяют оптимизировать вид и параметры нелинейности детектора с целью обеспечения заданных динамических свойств дискретных автономных и неавтономных СФС.

3. Полученные в диссертации результаты позволили сформулировать предложения по повышению эффективности разрабатываемых дискретных СФС, в том числе традиционных, и различных устройств с их применением (повышению надежности, расширению диапазона устойчивой работы, увеличению полосы рабочих частот, быстродействия): высокостабильных генераторов сигналов с частотной модуляцией, однокольцевых и многокольцевых систем частотного синтеза, синтезаторов на основе комбинированных связанных систем, синхронно-фазовых демодуляторов и следящих измерителей.

4. Предложенные и развитые в диссертации методы, и разработанные на их основе алгоритмы и программы можно использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах для анализа нелинейных свойств дискретных систем синхронизации и синтеза дискретных систем синхронизации различного назначения.

Реализация и внедрение результатов.

Результаты диссертации использованы в 8 научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполненных согласно решениям ВПК и Постановлениям ЦК и Совета Министров; внедрены в проекты, выполняемые в рамках межвузовской научно-технической программы "Университеты России", федеральной целевой программы "Интеграция", единого заказ-наряда Минобрнауки России. Использование результатов работы в НИОКР и научных проектах подтверждено актами о внедрении. Предложенные при этом технические решения защищены 13 авторскими свидетельствами. Разработанный под руководством автора один из первых вариантов синтезатора частоты дециметрового диапазона на основе комбинированных дискретных СФС вошел в состав электронного комплекса, получившего в 1985 году премию Ленинского комсомола в области науки и техники.

В ходе работы над диссертацией в отраслевых научно-исследовательских лабораториях "Поликом" и "Дискрет" ЯрГУ под руководством и при

непосредственном личном участии автора был создан ряд высокоэффективных устройств частотного синтеза, возбуждителей ЧМ-колебаний, синхронно-фазовых демодуляторов, базирующихся на применении теоретических и прикладных результатов исследования дискретных СФС различных классов, в том числе однокольцевых, связанных, комбинированных и систем с циклическим прерыванием режима автоподстройки. Разработки внедрены на предприятиях г. Ярославля (ОКБ радиозавода), г. Москвы (ЦНИРТИ), г. Рыбинска (ОКБ «Луч»).

Часть материалов, включая разработанное программное обеспечение, используется в учебном процессе Института криптографии, связи и информатики Академии ФСБ России, МГТУ им. Баумана г. Москва, РГАТА г. Рыбинск, ЯрГУ г. Ярославль.

Апробация работы.

Значительная часть результатов диссертационной работы опубликована в монографии Шахтарина Б.И. «Анализ систем синхронизации методом усреднения», М.: Радио и связь, 1999 г.: главе 13 – «Анализ дискретных ФАС 2-го порядка (усреднение разностных уравнений)», разделе 14.5 – «Применение качественно-аналитических методов для анализа нелинейной динамики дискретной ФАС 3-го порядка», приложении 11 – «Нелинейная динамика дискретных ФАС 2-го порядка с кусочно-линейной характеристикой детектора», в 8 отчетах по НИР и ОКР, 9-и публикациях в научных центральных журналах, 5 статьях в межвузовских сборниках, 5 депонированных рукописях, материалах 7 международных и 9 Всесоюзных семинаров и конференций, 13 описаниях изобретений, двух учебных пособиях.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели ряда перспективных дискретных СФС, в том числе различных модификаций двухкольцевых связанных систем и систем с циклическим прерыванием режима автоподстройки.

2. Разработанные на основе общих положений качественных методов теории нелинейных дискретных колебаний и теории бифуркаций методы анализа нелинейной динамики различных классов дискретных СФС с одной и двумя периодическими нелинейностями, в том числе неавтономных.

3. Разработанные на основе общих положений метода гармонической линеаризации ряд методов анализа периодических движений для СФС высокого порядка, СФС с несколькими временными дискретами и разрывным временем.

4. Результаты исследования динамических характеристик конкретных типов дискретных СФС второго и третьего порядков, используемых при создании высокостабильных генераторов ЧМ-колебаний, цифровых синхронно-фазовых демодуляторов, синтезаторов частоты: однокольцевых импульсных и цифровых СФС с различными видами характеристик детектора, связанных

двухкольцевых СФС с преобразованием частоты в кольцах и без преобразования, комбинированных дискретных систем частотно-фазовой автоподстройки, дискретных СФС с прерыванием режима автоподстройки с предустановкой и без предустановки фазы в момент смены режима функционирования.

5. Предложения по повышению эффективности и параметрической оптимизации дискретных СФС и устройств с их применением и конкретные технические решения, внедренные на предприятиях г. Москвы (ЦНИРТИ), г. Ярославля (ОКБ радиозавода), г. Рыбинска (ОКБ «Луч»).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 325 страницах, из которых 87 страниц рисунков. Список литературы содержит 195 наименований. В приложения вынесены материалы о внедрении результатов диссертационной работы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и ее практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, дан критический анализ работ в области исследования динамических характеристик различных классов дискретных систем фазовой синхронизации.

Первая глава посвящена построению обобщенных математических моделей дискретных систем фазовой синхронизации различных классов в форме систем разностных уравнений. Рассмотрены следующие классы дискретных СФС: однокольцевые импульсные системы и цифровые системы с многоуровневым квантованием с постоянным периодом дискретизации, многокольцевые связанные и комбинированные системы с перекрестными связями между кольцами - системы с несколькими временными дискретами, однокольцевые системы с периодическим прерыванием режима автоподстройки - системы с разрывным временем.

Обобщенная математическая модель однокольцевой дискретной СФС третьего порядка представляет собой отображения вида:

$$\begin{cases} \varphi_{n+1} = \varphi_n - \alpha F(\varphi_n) + x_n + g_n \\ x_{n+1} = dx_n - \beta F(\varphi_n) + y_n + g \\ y_{n+1} = hx_n - \eta F(\varphi_n) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_n &= d(\varphi_n - \varphi_{n-1}) + h(\varphi_{n-1} - \varphi_{n-2}) + (d\alpha - \beta)F(\varphi_{n-1}) + \\ &\quad + (h\alpha - \eta)F(\varphi_{n-2}) + g - dg_{n-1} - hg_{n-2} \\ y_n &= h(\varphi_n - \varphi_{n-1}) + (h\alpha - \eta)F(\varphi_{n-1}), \end{aligned}$$

где φ_n – разность фаз импульсных либо кодовых последовательностей на входах детектора, $\alpha, \beta, \eta, d, h, g$ – обобщенные параметры, $F(\varphi) – 2\pi$ – периодическая характеристика фазового детектора. При $h = \eta = 0$ (1) переходит в отображение 2-го порядка.

Отображение (1) описывает достаточно широкий класс импульсных и цифровых СФС с различными типами фильтров в цепи управления. В частности, для импульсной СФС с пропорционально-интегрирующим фильтром обобщенные параметры связаны с физическими следующим образом:

$$\begin{aligned} h &= \eta = 0, \\ \alpha &= D \left(1 - \frac{(1-m)(1-d)}{\alpha_p}\right), \quad \beta = D \frac{(1-m)(1-d)^2}{\alpha_p}, \\ g &= D(1-d)\gamma, \quad g_n = D\gamma_n, \quad d = \exp(-\alpha_p), \quad \alpha_p = \frac{T}{T_f}, \quad D = \frac{\omega_y T}{\pi N}, \end{aligned} \quad (2)$$

D – обобщенный коэффициент усиления кольца по постоянному току, γ – нормированная начальная расстройка по частоте, T – период дискретизации кольца, ω_y – полоса удержания кольца, T_f – постоянная времени фильтра, m – коэффициент пропорциональности фильтра, N – коэффициент деления делителя частоты в цепи обратной связи.

Для связанных дискретных СФС и комбинированных систем с частотным управлением предложена классификация, согласно которой введены:

- системы с двумя внешними опорными колебаниями;
- системы с двумя внешними опорными колебаниями и преобразованием частоты внутри колец;
- системы с одним внешним опорным колебанием.

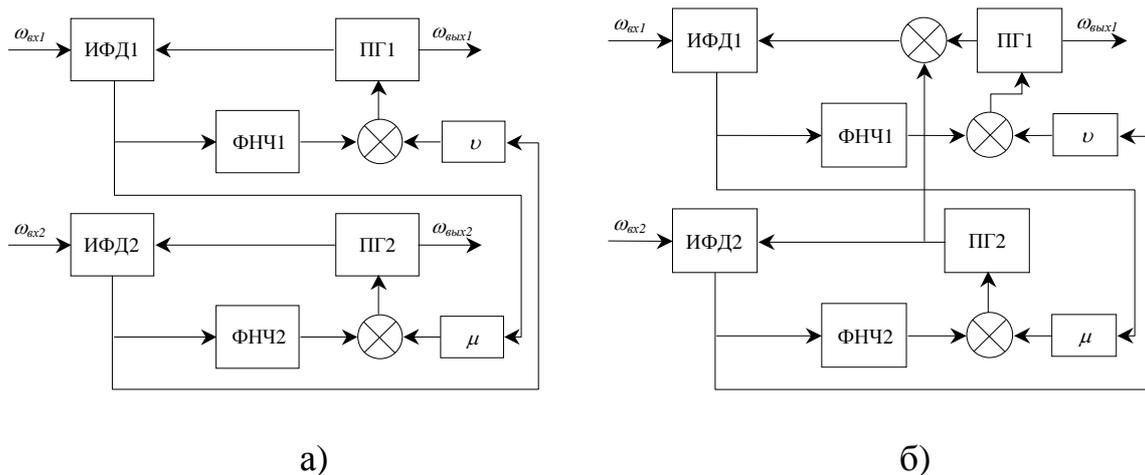


Рис. 1

На рис.1 и рис.2 приведены примеры структурных схем связанных импульсных СФС для первых двух классов. В обеих схемах связь между кольцами обеспечивается с помощью линейных узлов с коэффициентами

передачи μ и ν ($|\mu| < 1$ и $|\nu| < 1$). Первая система обеспечивает повышенные динамические характеристики и может найти применение в устройствах синтеза с ограниченным частотным диапазоном. Цифровой вариант такой системы может быть использован в следящем измерителе или синхронно-фазовом демодуляторе. Вторая схема может составить основу быстродействующего широкополосного синтезатора частоты дециметрового или сантиметрового диапазонов с повышенными требованиями к качеству синтезируемого сигнала.

Существование перекрестных связей между кольцами приводит к новому классу дискретных СФС, отличительной особенностью которого является наличие нескольких в общем случае временных дискретов. Данная особенность требует нестандартного подхода к построению математических моделей подобных систем. Суть подхода состоит в переходе к новой временной шкале $(n,i)\Delta T$ (связанной с собственными шкалами колец T_1 и T_2 , $\Delta T = T_1/k_1 = T_2/k_2$). В терминах обобщенных параметров в главе получены уравнения двухкольцевых связанных СФС и комбинированных систем с частотным управлением в виде отображений различных порядков. Для связанных импульсных систем первых двух классов с пропорционально-интегрирующим фильтром в одном из колец системы уравнений имеют вид отображения 3-го порядка:

$$\begin{cases} \varphi_{n,i+1} = \varphi_{n,i} + \chi_{n,i} - \frac{\alpha}{k_1} \left(1 - \frac{(1-m) \cdot (1-d_0)}{\alpha_0} - j \cdot \mu \right) \cdot \hat{F}(\varphi_{n,i}) + \\ + \frac{\alpha \cdot \gamma_{н1}}{k_1} + \frac{(j \cdot 1 - \mathcal{D}) \cdot \beta}{k_2 \cdot \nu} \cdot \hat{\Phi}(\psi_{n,i}) \\ \psi_{n,i+1} = \psi_{n,i} - \frac{\beta}{k_2} \cdot \hat{\Phi}(\psi_{n,i}) + \frac{\beta \cdot \gamma_{н2}}{k_2} - \frac{\mu \cdot \alpha \cdot \nu}{k_1} \cdot \hat{F}(\varphi_{n,i}) \\ \chi_{n,i+1} = d_0 \cdot \chi_{n,i} - \frac{\alpha}{k_1} \cdot \frac{(1-m) \cdot (1-d_0)^2}{\alpha_0} \cdot \hat{F}(\varphi_{n,i}) \end{cases} \quad (3)$$

здесь $j=0$ – соответствует связанной системе без преобразования частоты, $j=1$ – связанной системе с преобразованием частоты, $i = 0, 1, 2, \dots, (k_1 \cdot k_2 - 1)$; $\varphi_{n,i}, \psi_{n,i}$ – разность фаз импульсных последовательностей на входах детекторов в первом и втором кольцах; α, β – обобщенные коэффициенты усиления в кольцах; $\gamma_{н1}, \gamma_{н2}$, – нормированные начальные частотные расстройки; $\nu = N_1 / N_2$, $\alpha_0 = \Delta T / T_f$, $d_0 = \exp(-\alpha_0)$, N_1, N_2 – коэффициенты деления делителей частоты в кольцах, $\hat{F}(\varphi_{n,i}), \hat{\Phi}(\psi_{n,i})$ – функции, описывающие преобразование разности фаз в детекторах с учетом момента фактической дискретизации.

Для дискретных систем фазовой синхронизации с периодическим прерыванием режима автоподстройки также введена классификация. Выделены системы с циклическим прерыванием без привязки и с привязкой разности фаз на входах детектора в момент замыкания кольца.

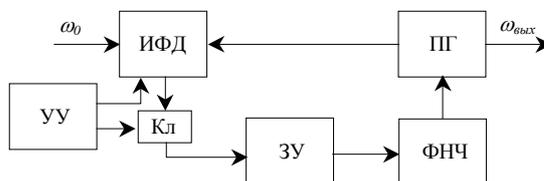


Рис.2

Общая структурная схема СФС с прерыванием приведена на рис.2. Для импульсной системы с пропорционально-интегрирующим фильтром с привязкой фазы математическая модель представляет собой комбинацию из трех отображений 2-го порядка следующего вида:

$$\begin{cases} \varphi_{n,i+1} = \varphi_{n,i} - \alpha F(\varphi_{n,i}) + x_{n,i} \\ x_{n,i+1} = d x_{n,i} - \beta F(\varphi_{n,i}) + g \end{cases}, 0 \leq i < k, \\ \begin{cases} \varphi_{n,i+1} = \varphi_{n,i} - \alpha F(\varphi_{n,k-1}) + x_{n,i} \\ x_{n,i+1} = d x_{n,i} - \beta F(\varphi_{n,k-1}) + g \end{cases}, k \leq i < k+l, \\ \begin{cases} \varphi_{n+1,0} = \varphi_0 \\ x_{n+1,0} = x_{n,k+l} + d(\varphi_0 - \varphi_{n,k+l}) \end{cases}, \end{cases} \quad (4)$$

где k и l - соответственно нормированные времена замыкания и размыкания кольца.

Математической моделью для системы без привязки фазы будет служить комбинация из первых двух отображений. Для $d=g=0$ отображение (4) является моделью импульсной системы с астатическим звеном в цепи управления.

Вторая глава посвящена обсуждению методов и результатов анализа нелинейной динамики дискретных СФС 2-го порядка. На основе общих положений качественных методов теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций обосновывается ряд положений, определяющих нелинейное поведение дискретных СФС на фазовом цилиндре второго порядка для широкого класса нелинейностей: гладких (синусоидальной), кусочно-линейных (треугольной), разрывных (пилообразной). К числу их относятся возможные сценарии бифуркаций в системах при изменении обобщенной частотной расстройки, условия и характер возникновения и исчезновения состояний равновесия, периодических движений произвольной структуры и квазипериодических движений.

В основе исследований лежит анализ бифуркаций неподвижных точек, связанных с потерей устойчивости. Для отображения с гладкой нелинейностью возможные бифуркации определяются точечным отображением, рассматриваемым на некоторой локально устойчивой инвариантной кривой, существующей в окрестности неподвижной точки. Условия существования подобной кривой определяются известными теоремами о преобразовании исходного отображения к диагональному виду и о центральном многообразии. На инвариантной кривой рассматриваемое отображение принимает вид одномерного отображения $\bar{x}^* = f(x^*, \mu)$, с помощью которого исследуются возможные бифуркации неподвижных точек с изменением параметра μ , связанные с потерей их устойчивости.

Для кусочно-линейных и разрывных отображений построение инвариантных кривых в аналитическом виде и соответственно одномерных отображений исключается. Для этого случая предложен подход, основанный на ряде доказанных утверждений относительно возможных бифуркаций неподвижных точек. К числу их относятся: утверждение о существовании простейших бифуркаций, связанных с изменением характера неподвижной точки порядка k (порядок особой точки равен периоду циклического движения), включая потерю устойчивости, на участках линейности отображений; утверждение об одновременном возникновении двух неподвижных точек через сложную точку узел-седло либо фокус-седло в граничных точках кусочно-линейного отображения; утверждение об изменении порядка неподвижной точки k только в граничных точках отображения; наконец, утверждение об исчезновении неподвижных точек также через сложную точку узел-седло либо фокус-седло в граничных точках отображения.

С учетом доказанных утверждений разработана методика определения точных значений бифуркационных значений параметров, приводящих к появлению либо исчезновению неподвижных точек. В основе ее лежит условие касания вектором состояния одной из неподвижных точек, входящих в состав циклического движения, одной из границ фазового цилиндра (включая точки излома нелинейности), совпадающей с границей соответствующей области нелинейного отображения.

В случае пилообразной нелинейности, например, в качестве такой границы выступает граница фазового цилиндра $\varphi = -1$. Соответственно условие касания вектором неподвижной точки \vec{q}_i указанной границы и сам вектор \vec{q}_i имеют вид:

$$\begin{cases} g \cdot [(T_L - E)^{-1}]_{12} = 1 + 2 \cdot [(T_L^k - E)^{-1}]_{11} \\ x_{0k} = 2 \cdot [(T_L^k - E)^{-1}]_{21} - g \cdot [(T_L - E)^{-1}]_{22}, \\ (d\alpha - \beta + g) < x_{0k} < (d(2 - \alpha) + \beta + g) \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{q}_j = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} T_L^i (\bar{p}_{k-i-1}(j) + \bar{r})}{E - T_L^k} = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} T_L^i \bar{p}_{k-i-1}(j)}{E - T_L^k} + \frac{\bar{r}}{E - T_L}, \quad (6)$$

где T_L – матрица линейного отображения, \bar{r} – вектор, характеризующий воздействие на систему, $\bar{p}_i(j)$ – вектор, определяющий нелинейное отображение на i -ом шаге и принимающий вид: $(0,0)^T$ либо $(-2,0)^T$, через $[\bullet]_{i,j}$ обозначен элемент матрицы (i, j)

Решение (5) дает точные значения бифуркационных параметров, определяющих границы области существования цикла структуры $(1/k)$. В общем случае для произвольных параметров решение может быть получено численным способом. Для обобщенной частотной расстройки оно имеет вид:

$$g = \frac{1 + 2 \cdot [(T_L^k - E)^{-1}]_{11}}{[(T_L - E)^{-1}]_{12}}. \quad (7)$$

Выражения, аналогичные (5), (6) получены для более сложных циклических движений первого и второго рода. В то же время для решения конкретных задач необходимость анализа таких движений может отпасть. Доказано, что с ростом обобщенной расстройки g в отображении 2-го порядка с пилообразной нелинейностью первыми возникают циклы структуры $(1/k)$. Таким образом, для определения полосы захвата системы с пропорционально интегрирующим фильтром достаточно воспользоваться выражением (7).

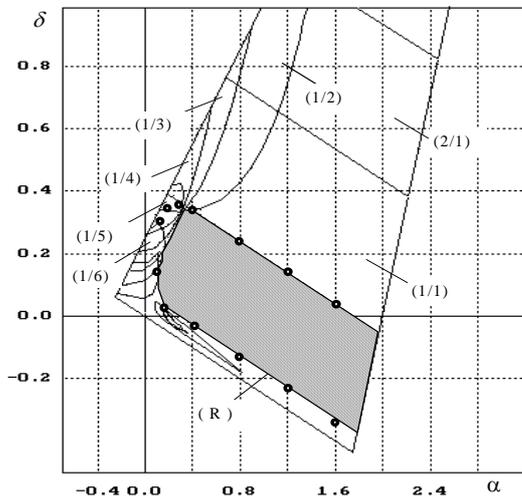


Рис.3

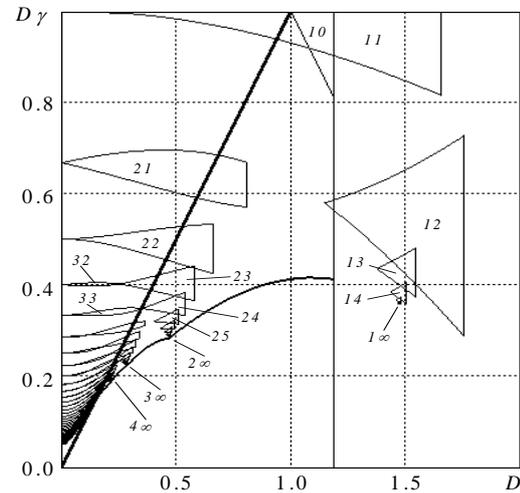


Рис.4

Аналогичная методика использована для других видов кусочно-линейных отображений. На основе разработанных алгоритмов получены области существования различных периодических движений, характеризующие нелинейную динамику импульсных СФС второго порядка с кусочно-линейной характеристикой детектора. На рис. 3 на плоскости обобщенных параметров приведены примеры таких областей для пилообразной нелинейности

(заштрихована область устойчивости в целом, точками показана область устойчивости в целом, полученная методом усреднения), на рис. 4 на плоскости физических параметров – для треугольной нелинейности.

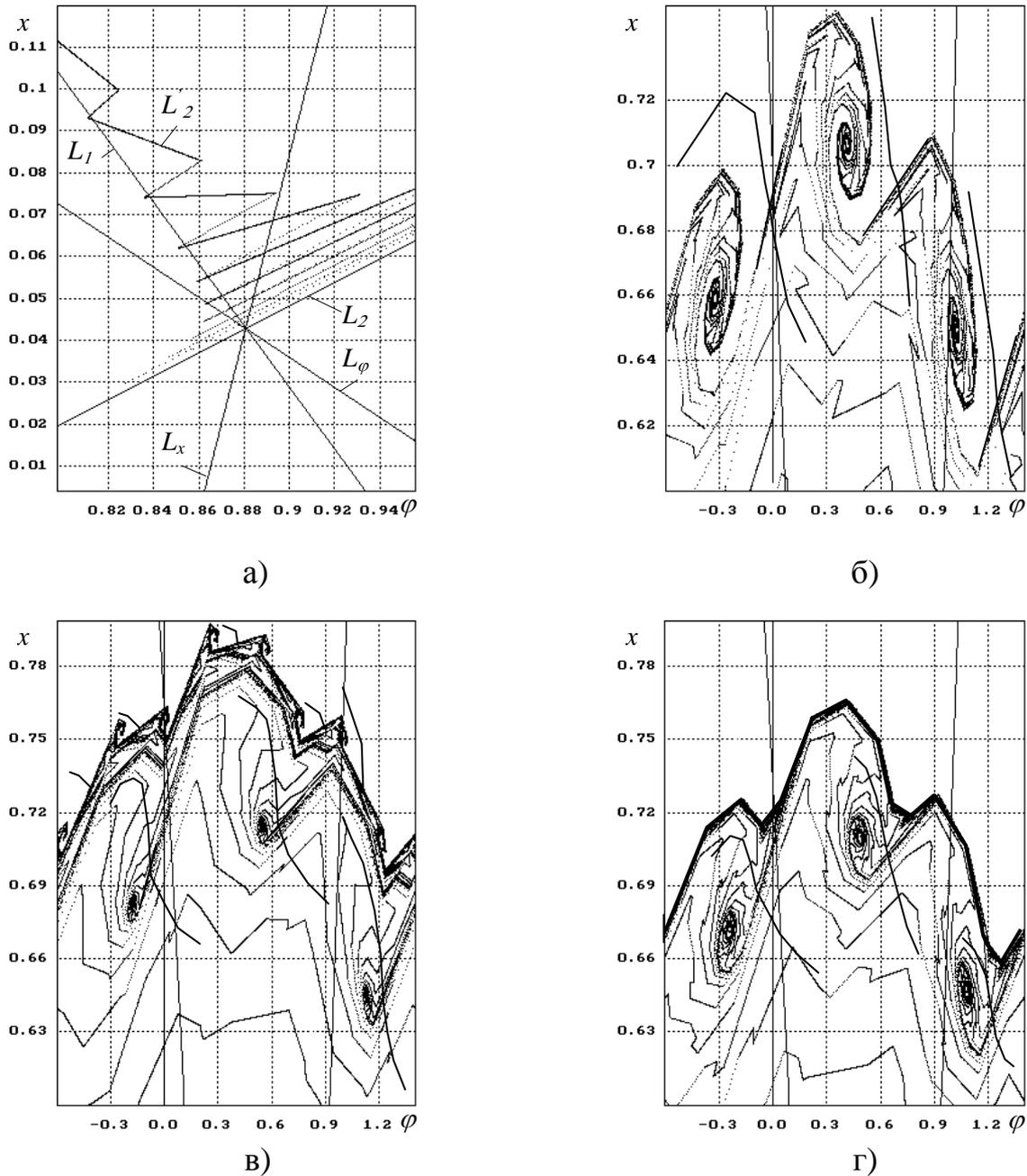


Рис. 5

Существует принципиальное отличие областей устойчивости в целом для пилообразной и треугольной нелинейностей. В первом случае область ограничивается простейшими циклами конечного периода. В случае треугольной нелинейности область устойчивости ограничивается циклами с одним проскальзыванием но бесконечным числом точек на неустойчивой ветви. Эти циклы имеют практически нулевую область существования, но в

тоже время формируют узловые точки области устойчивости. В свою очередь, узловые точки могут соединяться границей существования квазипериодических движений, возникающих в отображении с треугольной нелинейностью при определенных условиях (рис.4). Механизм их возникновения поясняется рис.5, на котором приведены типичные фазовые портреты для кусочно-линейного отображения, возникающие с ростом обобщенной расстройки (случай достаточно сильной колебательности; для гладкого отображения результаты качественно повторяются).

На рис.5а приведена граничная ситуация перехода от состояния с единственной устойчивой точкой (состояния синхронизма) к состоянию с притягивающей инвариантной кривой (квазипериодическое движение). Переход происходит через пересечение входящей L_1 и выходящей L_2 инвариантных сепаратрисных кривых (L'_2 – продолжение выходящей сепаратрисы на следующем периоде фазового цилиндра). Подобная бифуркация возможна, если при расстройке, соответствующей касанию L_1 L'_2 , отсутствуют устойчивые периодические движения. На рис. 5б приведена ситуация, когда с ростом расстройки наблюдается переход от состояния системы с единственной устойчивой точкой равновесия к состоянию с вращательным движением ($k=3$) без образования притягивающей инвариантной кривой, что обеспечивается взаимным расположением сепаратрисных кривых неподвижных точек типа седло. На рис.5в существует два вращательных движения: периода $k=3$ с одним проскальзыванием (охватом цилиндра) и $k=8$ с тремя проскальзываниями. Неподвижные точки типа седло для двух движений имеют качественно различное взаимное расположение сепаратрисных кривых. На рис.5г приведена ситуация с одним вращательным движением, область притяжения которого сверху ограничена квазипериодическим движением. Последнее возникло согласно расположению сепаратрисных кривых неподвижных точек типа седло (выходящая выше входящей).

На рис. 6, 7 приведены примеры зависимостей полосы захвата системы соответственно для пилообразной и треугольной нелинейностей. Точками показаны результаты, полученные численным методом Монте-Карло.

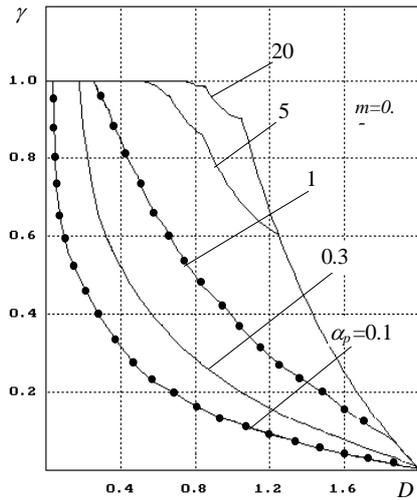


Рис. 6.

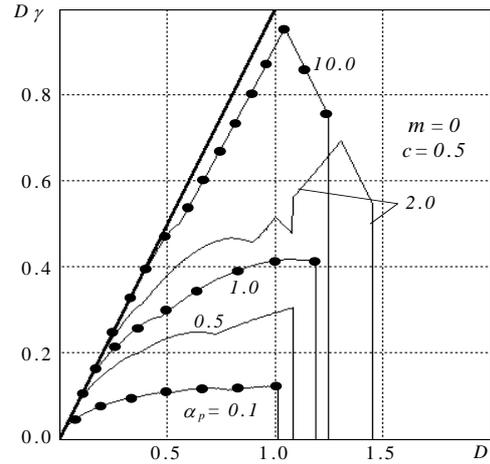


Рис. 7

На рис. 8 приведены зависимости полосы захвата дискретной СФС с интегрирующим фильтром с независимым пропорциональным каналом для случая пилообразной нелинейности. Модели с подобным фильтром являются характерными для цифровых СФС с большим числом уровней квантования.

Отличительной особенностью зависимостей является ограничение области захвата со стороны малых частотных расстройок за счет высокочастотных симметричных циклов первого рода.

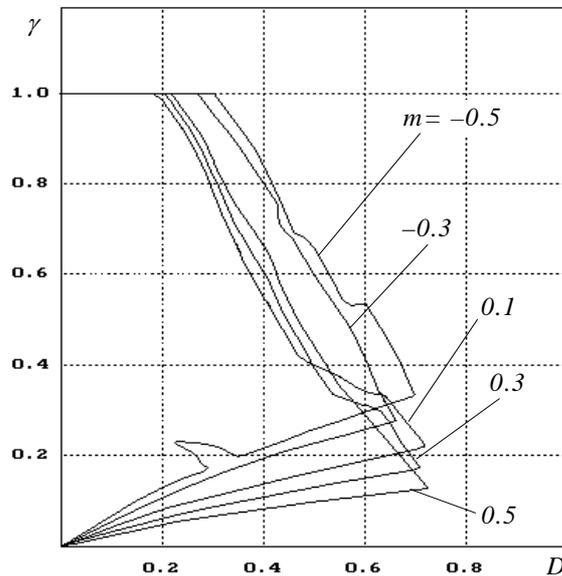


Рис. 8

Подобные циклы исчезают при переходе к треугольной нелинейности. Объяснение состоит в необходимости перекрытия областей нелинейного отображения при переходе границ фазового цилиндра в разных направлениях для симметричных циклов.

Для анализа высокочастотных периодических движений (движений с малым периодом): областей существования на плоскости параметров, областей притяжения устойчивых неподвижных точек на фазовой плоскости, местоположения неустойчивых неподвижных точек, расположение инвариантных сепаратрисных кривых, в главе разработан алгоритм на основе метода гармонической линеаризации. Интерес к методу объясняется тем, что с одной стороны дискретные периодические движения с минимальным периодом ($k=2,3,4$) представляют собой гармонические колебания, в этом случае метод обеспечит абсолютно точный результат. С другой стороны, например, для анализа неустойчивых периодических режимов систем с гладкими нелинейностями он по сути является единственным, дающим достаточно точный результат. Известный метод гармонической линеаризации адаптирован к дискретным системам с периодической нелинейностью. Получены в явном виде выражения для коэффициента гармонической линеаризации $K(a, \varphi, \varpi)$ с учетом периодичности характеристики для различных типов возможных установившихся движений, как симметричных так и несимметричных. Например, для простейших несимметричных колебаний с периодом $k=2$ коэффициент имеет вид:

$$K(a, \varphi, \pi) = \frac{2(1 - a \cdot \text{Cos}(\varphi) + \text{int}[a \cdot \text{Cos}(\varphi)]) \cdot \exp(-j\varphi)}{a}, \quad (8)$$

$$m \leq (a_0 + a \cdot \text{Cos}(\varphi)) < m + 1, \quad -\pi/2 \leq \varphi < \varphi/2, \quad (9)$$

где a , φ – амплитуда и фаза колебаний, m – параметр, определяемый числом целых периодов характеристики, на которых расположен цикл, a_0 – постоянная составляющая колебаний. Постоянная составляющая связана с частотной расстройкой в системе. Показано, что периодические движения четного периода возникают при малых расстройках, движения нечетного периода – при значительных расстройках. Влияние формы $F(\varphi)$ на движения различных периодов связано с условиями (9). Например, для движений с $k=2$, увеличение длительности неустойчивой ветви треугольной нелинейности приводит к нарушению первого из условий (9).

Для анализа эффектов квантования в цифровых СФС предложена методика, основанная на анализе предельных инвариантных кривых, определяющих возможное изменение координат точек, являющихся неподвижными в модели без эффектов квантования. Выбор метода связан с возможностью записи для отображения с кусочно-постоянной нелинейностью уравнений инвариантных кривых. Получены зависимости смещения координат простой неподвижной точки (состояния равновесия) от различных параметров. Установлен колебательный характер зависимости смещения от величины частотной расстройки. Для неподвижной точки, входящей в состав циклического движения, влияние эффектов квантования сводится к уменьшению области притяжения, в пределе к потере устойчивости. Получены

зависимости увеличения полосы захвата от числа уровней квантования N . С ростом N зависимость имеет спадающий колебательный характер.

Для анализа длительности переходных процессов в главе предложена методика, основанная на использовании понятия инвариантной кривой. Фазовый цилиндр разбивается на три участка: участок движения без пересечения границы цилиндра (охватывает состояния равновесия), движения с пересечением границы цилиндра на каждом шаге, движения с произвольным числом шагов на периоде цилиндра. Для первых двух участков оценки времени движения получается в аналитическом виде, для третьего участка – качественно-численным способом. Строится зависимость изменения координаты x при огибании изображающей точкой фазового цилиндра в зависимости от положения на фазовом цилиндре $\Delta x(x)$. Изменение Δx определяется разностью значений координаты x точек пересечения инвариантной кривой левой $\varphi = -1$ и правой $\varphi = 1$ границ фазового цилиндра. Далее от построенного отображения 1-го порядка $\Delta x(x)$ осуществляется переход к дифференциальному уравнению, численное интегрирование которого дает оценку времени движения между первым и вторым участками. С помощью предложенной методики получены зависимости времени переходных процессов от различных параметров системы

Для анализа установившихся режимов в неавтономных дискретных кусочно-линейных СФС при периодических воздействиях по частоте предложена методика, основанная на переходе к эквивалентному отображению, описывающему процессы в новом времени, дискрет которого совпадает с периодом входного сигнала. Для дискретной СФС 1-го порядка в случае кратного соотношения периода входного сигнала и системного дискрета построена функция последования, анализ которой позволил выявить устойчивые и неустойчивые неподвижные точки. Анализ неподвижных точек с позиции возможных бифуркаций позволил оценить области притяжения устойчивых точек, их возможные изменения, очередность появления точек различных порядков, при этом были использованы основные положения качественных методов, предложенных для анализа автономных систем. На основе анализа функции последования для пилообразного и гармонического воздействий для произвольных параметров получены области различных установившихся движений. Предложенная методика анализа областей установившихся движения применена также для отображений второго порядка.

Третья глава посвящена анализу нелинейной динамики дискретных кусочно-линейных СФС третьего порядка. Исследуются импульсные и цифровые системы с различными фильтрами нижних частот в цепи управления. Рассматриваются следующие фильтры: последовательное соединение двух пропорционально-интегрирующих звеньев и колебательное звено, характерные для импульсных СФС; последовательное соединение двух интегрирующих фильтров с независимыми пропорциональными каналами, характерное для цифровых СФС.

Изучаются возможные бифуркации неподвижных точек. Получили подтверждение доказанные во второй главе утверждения относительно условий возникновения и потери устойчивости неподвижных точек: все бифуркации, за исключением простейших, связанных с изменением характера точек, происходят в граничных точках кусочно-линейного отображения. Получили подтверждение на качественном уровне основные состояния фазового портрета, характерные для систем 2-го порядка (рис.5). Отличие состоит в большом многообразии различных типов особых точек, включая седловую.

В то же время с точки зрения возможных установившихся движений не имеет смысла рассматривать седловые точки, приводящие к знакопеременным процессам. К числу таких, например, относятся точки с отрицательным корнем характеристического уравнения $\rho < -1$, или точки с неустойчивым комплексно-сопряженными корнями. Движения в окрестности подобных точек с течением времени переходят в окрестность устойчивой точки равновесия. Как показано в главе, для анализа условий возникновения квазипериодических движений достаточно ограничиться рассмотрением варианта, при котором выходящее сепаратрисное многообразие является одномерным, а входящее – двумерным. Бифуркационное значение параметра, при котором это движение возникает, как и в случае отображения 2-го порядка определяется из условия касания сепаратрисных многообразий.

Получила развитие методика определения бифуркационных значений параметров системы, определяющих границы областей существования вращательных и колебательных движений в кусочно-линейных системах. Получены выражения, определяющие условия касания вектором состояния неподвижной точки границ областей нелинейного отображения. Границы представляет собой плоскости, проходящие через точки излома нелинейности. Разработаны алгоритмы, с помощью которых получены области существования вращательных и колебательных движений различных структур установлены закономерности их возникновения.

Основное качественное отличие от систем 2-го порядка состоит в повышенной роли колебательных режимов. Их можно разделить на движения четного (симметричные) и нечетного (несимметричные) периода. Первые из них возникают в области малых частотных расстройек и в силу этого имеют большое практическое значение, поскольку режимы с малыми частотными расстройками относятся к числу основных для СФС. Несимметричные колебательные движения, как и вращательные, возникают при больших частотных расстройках. На рис.9 в качестве примера для импульсной системы с пилообразной характеристикой детектора и двумя пропорционально интегрирующими фильтрами приведены области частотных расстройек, в которых существует симметричный цикл с периодом $k=2$.

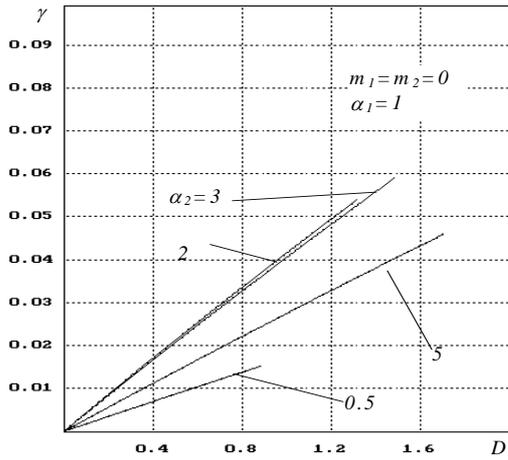


Рис. 9

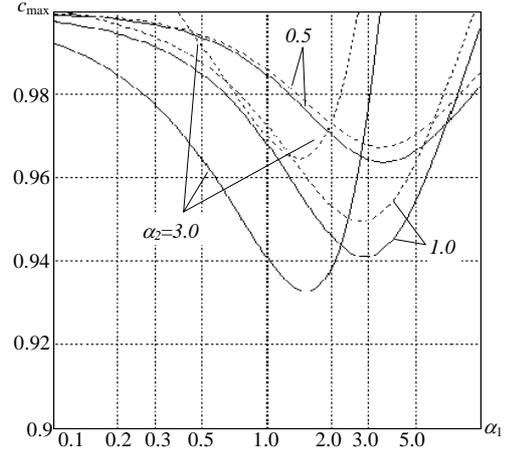


Рис.10

При переходе к треугольной нелинейности области существования данных движений существенно меньше, с ростом длительности неустойчивого участка они совсем исчезают. На рис.10 приведены максимальные длительности устойчивого участка характеристики, при которых существует цикл с $k=2$.

В главе получил развитие метод гармонической линейзации. Для систем повышенного порядка его роль возрастает, что объясняется ростом числа различных типов периодических движений. Наряду с областями существования симметричных и несимметричных колебательных движений метод позволил выполнить анализ движений с противоположным направлением вращения на цикле.

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейной динамики кусочно-линейных дискретных связанных СФС и комбинированных систем с частотным управлением. Все объекты представляют собой двухкольцевые системы с перекрестными связями между кольцами. Для комбинированных систем подобные связи существуют в силу структурного построения, поскольку кольца связаны через один объект управления – перестраиваемый генератор. В случае двухкольцевых СФС связи между кольцами дополнительно вводятся в систему для придания ей новых свойств. Использование связей позволяет в значительной степени изменять динамические свойства систем: быстродействие, область устойчивости в целом, область захвата по частоте. Особенностью моделей связанных систем является наличие двух периодических нелинейностей (за исключением модели комбинированных систем с линейным частотным детектором) и двух временных дискретов. Фазовым пространством подобных систем является тор.

В главе получили развитие методы анализа нелинейной динамики дискретных систем, предложенные в предыдущих главах, с учетом тороидального фазового пространства. Изучены бифуркации, связанные с возникновением неподвижных точек и потерей устойчивости в целом состояния равновесия. Получили подтверждение основные выводы, сделанные

для однокольцевых кусочно-линейных СФС относительно условий возникновения неподвижных точек, входящих в состав циклических движений. На основе утверждения о возникновении неподвижных точек в граничных точках нелинейностей $F(\varphi)$, $\Phi(\psi)$ разработана оригинальная методика определения бифуркационных значений параметров, приводящих к периодическим движениям.

Методика предполагает переход к эквивалентной нелинейной модели, описывающей движение во временной шкале с дискретом $T = k_1 \cdot k_2 \cdot \Delta T$. Для систем с пилообразными функциями $F(\varphi)$, $\Phi(\psi)$ эквивалентное уравнение будет иметь вид:

$$\vec{q}_{n+1} = A_3 \cdot \vec{q}_n + \vec{b}_3 - \vec{s}_n, \quad (11)$$

где A_3 – эквивалентная линеаризованная матрица, b_3 – эквивалентный вектор входного воздействия, \vec{s}_n – суммарный вектор нелинейного смещения вектора состояния за T .

В соответствии с (11) вектор состояния произвольной неподвижной точки циклического движения заданной структуры периода k будет иметь вид:

$$\vec{q}_n = (E - A_3)^{-1} \vec{b}_3 - (E - A_3^k) \sum_{j=0}^{k-1} A_3^{k-1-j} \cdot \vec{s}_{n,j}. \quad (12)$$

Касание вектором (12) одной из плоскостей, проходящих через граничные точки нелинейностей $F(\varphi)$, $\Phi(\psi)$, определяет условие возникновения цикла заданной структуры.

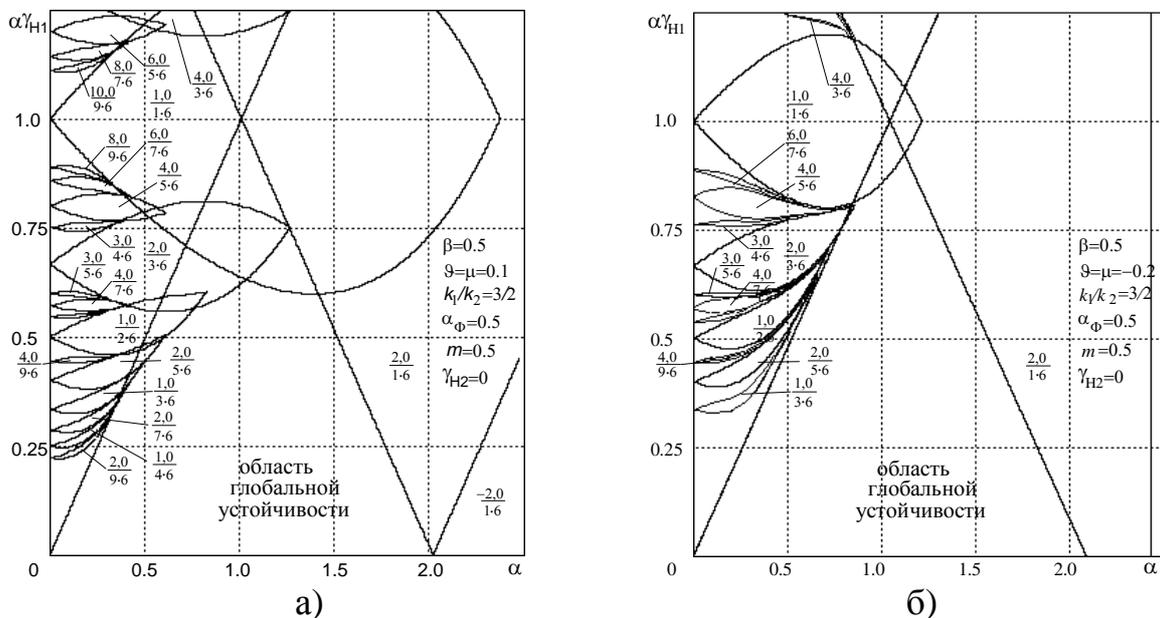


Рис.11

На основании разработанных алгоритмов получены области существования периодических движений в связанных СФС различных классов и комбинированных системах частотно-фазовой автоподстройки. На плоскости

обобщенных параметров получены области устойчивости в большом и в целом, на плоскости физических параметров построены зависимости для областей захвата. В качестве примера на рис.11 приведено распределение областей существования циклических движений и область устойчивости в целом в двухкольцевой импульсной СФС второго типа с пропорционально интегрирующим фильтром в выходном кольце для нулевых (рис.11а) и ненулевых (рис.11б) взаимных связей. Отмечается расширение области устойчивости за счет дополнительных связей.

В пятой главе исследуется нелинейная динамика двух типов моделей импульсных систем фазовой синхронизации с пилообразной характеристикой детектора с циклическим прерыванием режима автоподстройки. Для первого типа рассматривается импульсное кольцо с пропорционально интегрирующим фильтром, для второго типа – импульсное кольцо с астатическим фильтром в цепи управления. Получили развитие методы анализа, разработанные в предыдущих главах, применительно к системам с разрывным временем. Методика анализа установившихся движений предполагает переход в новое время, определяемое циклом работы системы. Рассматриваются условия возникновения и потери устойчивости неподвижных точек в новом времени. На основе предложенных методик разработаны алгоритмы определения бифуркационных значений параметров, при которых возникают циклические движения. Условие возникновения связано с касанием вектором состояния неподвижной точки, определенным в новом времени, границы фазового цилиндра.

В главе развит метод гармонической линеаризации для дискретных СФС с прерыванием. Получены выражения для амплитудно-фазовой характеристики приведенной линейной части системы и коэффициента гармонической линеаризации функции детектора, соответствующих системе эквивалентных разностных уравнений. Подобный подход позволил свести анализируемые периодические движения к простейшим гармоническим колебаниям минимального периода с $k=1,2,3,4$. Особенностью эквивалентной амплитудно-фазовой характеристики является ее зависимость от структуры колебательного движения. В случае нелинейного отображения на интервале паузы ее вид зависит от временных параметров цикла работы кольца (k, l) и не зависит от момента нелинейного отображения, для нелинейного отображения на интервале работы ее вид зависит и от момента нелинейного отображения.

На рис.12а приведены области существования наиболее значимых колебательных и вращательных движений для системы 1-го типа. Области нанесены непосредственно на диаграммы локальной устойчивости состояния синхронизма. На плоскости обобщенных параметров форма области локальной устойчивости повторяет треугольник устойчивости для дискретных систем 2-го порядка с характерными вырезами по периметру. Количество вырезов совпадает с числом системных тактов, соответствующих режиму замкнутого кольца.

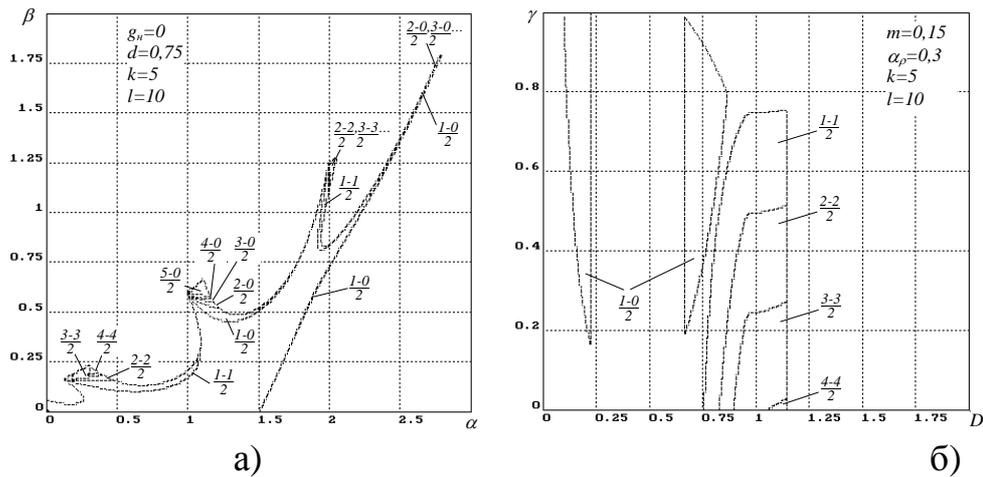


Рис. 12

Для периодических режимов установлена следующая закономерность: в области малых и средних значений усиления в кольце четные выбросы на диаграмме устойчивости заняты колебательными движениями, нечетные – вращательными. С ростом усиления подобная тенденция несколько сглаживается за счет появления комбинированных движений. На рис.12б приведены области существования периодических движений на плоскости физических параметров. Данные результаты можно рассматривать в качестве зависимости предельных значений частотной расстройки от усиления в системе.

В шестой главе приводятся примеры технической реализации и экспериментальных исследований ряда устройств, основанных на различных вариантах дискретных СФС, исследованных в диссертации. К числу их относятся: быстродействующий широкополосный синтезатор частоты дециметрового диапазона на основе комбинированной системы частотно-фазовой автоподстройки, быстродействующий синтезатор частоты дециметрового диапазона на основе двухкольцевой импульсной СФС, возбудитель ЧМ-колебаний дециметрового диапазона на основе импульсной СФС с циклическим прерыванием, цифровой синхронно-фазовый демодулятор с многоуровневым АЦП на входе. В основу разработок легли идеи, содержащиеся в авторских свидетельствах на изобретения, приведенных в списке публикаций, и результаты исследований нелинейной динамики дискретных СФС, проведенных в диссертации.

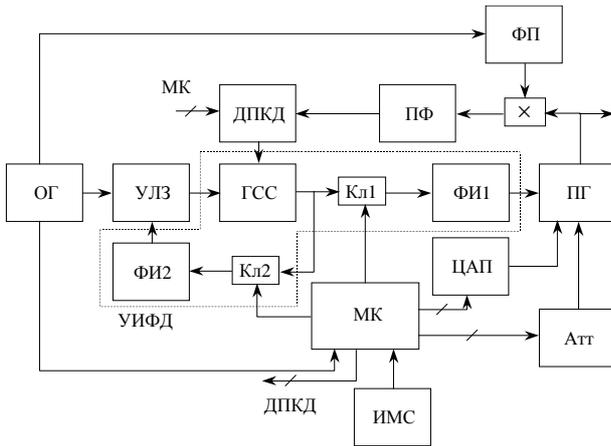


Рис.13

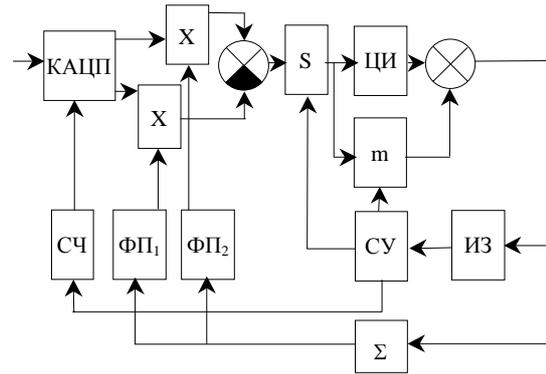


Рис.14

Структурные схемы двух устройств, в основе которых лежат соответственно импульсная СФС с прерыванием второго типа и однокольцевая цифровая СФС, приведены на рис.13 и рис.14. Использование в синтезаторе-возбудителе ЧМ-колебаний дециметрового диапазона с модуляцией телевизионным сигналом режима прерывания автоподстройки с привязкой фазы позволило решить проблему стабильности генерируемой частоты, соответствующей заданному уровню синхро-импульса телевизионного сигнала (рис.13). По сравнению с известными решениями удалось поднять стабильность на порядок и довести ее практически до уровня опорного генератора.

На рис.14 приведена структурная схема синхронно-фазового демодулятора с квадратурным аналого-цифровым преобразователем на входе на основе цифровой СФС второго порядка астатизма. Применение режима управления параметрами кольца и начальным состоянием позволило обеспечить устойчивую работу демодулятора в широком диапазоне входных частот (полоса тракта промежуточной частоты много больше полосы информационного сигнала). В основу алгоритмов управления положены результаты анализа неавтономных режимов цифровых СФС и устойчивости в целом.

В заключении кратко подведены итоги диссертации.

Приложения содержат вспомогательные результаты, включая акты внедрения диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

К числу основных результатов диссертационной работы относится разработка и развитие ряда эффективных методов анализа нелинейной динамики дискретных СФС, позволяющих проводить исследование и расчет динамических свойств широкого класса импульсных, цифровых, импульсно-цифровых, связанных многокольцевых СФС, СФС с циклическим прерыванием режима автоподстройки, составляющих основу перспективных систем обработки информации, генераторов сигналов с угловой модуляцией, устройств частотного синтеза и стабилизации частоты. Разработанные методы

обеспечивают высокую степень точности определения динамических характеристик для произвольных параметров систем и доведены до расчетных соотношений или систем алгебраических уравнений, к которым могут быть применены известные методы решения. Применение методов позволило провести анализ и оптимизацию параметров как традиционных однокольцевых импульсных и цифровых с многоуровневым квантованием СФС различных порядков, так и перспективных связанных и комбинированных СФС и различных типов СФС с циклическим прерыванием автоподстройки.

Наиболее значимые итоги работы сводятся к следующим:

1. Построены обобщенные математические модели различных классов автономных и неавтономных дискретных СФС, включая однокольцевые импульсные и цифровые системы, связанные двухкольцевые системы с преобразованием и без преобразования частоты внутри колец, комбинированные импульсно-цифровые системы с частотным управлением, системы с циклическим прерыванием режима автоподстройки.

2. На основе общих положений качественных методов теории нелинейных дискретных колебаний и теории бифуркаций разработаны эффективные методы исследования движений в импульсных и цифровых СФС с различными типами нелинейностей, основанные на условиях возникновения неподвижных точек и их бифуркациях. Для исследования влияния эффектов квантования на динамические характеристики предложен метод, основанный на построении предельных инвариантных кривых.

3. Предложены методы исследования установившихся движений в неавтономных дискретных СФС. Для кратного соотношения периодов входного воздействия и дискретизации системы разработана методика расчета областей существования различных установившихся режимов для периодических по частоте воздействий.

4. Разработаны качественные методы исследования периодических и квазипериодических движений на фазовом цилиндре и торе для связанных импульсных СФС и комбинированных импульсно-цифровых систем с частотным управлением, особенностью которых является наличие нескольких временных дискретов. Предложенные методы основываются на эквивалентном описании систем в новой временной шкале.

5. Предложен вариант качественного метода анализа периодических и квазипериодических движений на фазовом цилиндре для дискретных СФС с циклическим прерыванием режима автоподстройки. Как и в случае связанных СФС метод основан на эквивалентном описании систем в новой временной шкале.

6. На основе общих положений метода гармонической линеаризации разработаны эффективные методы исследования симметричных и несимметричных периодических движений в дискретных СФС с постоянным периодом дискретизации, связанных СФС с несколькими временными дискретами и СФС с циклическим прерыванием автоподстройки

7. На основе разработанных в диссертации методов анализа нелинейной динамики построены алгоритмы определения областей существования периодических и квазипериодических движений, областей устойчивости в большом и в целом для широкого класса дискретных СФС.

8. На основе разработанных методов и алгоритмов выполнено исследование нелинейной динамики большого количества конкретных типов автономных дискретных СФС с различными видами нелинейностей детектора, включая однокольцевые импульсные и цифровые СФС различных порядков, двухкольцевые связанные СФС различных типов, комбинированные импульсно-цифровые системы частотно-фазовой автоподстройки, импульсные СФС с циклическим прерыванием автоподстройки различных типов.

9. Выполнено исследование нелинейной динамики неавтономных импульсных СФС различных порядков при детерминированных входных воздействиях. Для воздействий в виде ЧМ-колебаний с пилообразным и гармоническим изменением входной частоты для кусочно-линейной характеристики детектора получены области существования различных установившихся движений, установлены основные бифуркации.

10. Результаты проведенных исследований позволили сформулировать предложения по повышению эффективности и параметрической оптимизации основных динамических характеристик (области устойчивой работы, диапазона рабочих частот, быстродействия) рассматриваемых классов дискретных СФС, используемых в устройствах обработки информации, генерации высокостабильных ЧМ-колебаний, стабилизации несущих частот, частотного синтеза.

11. Создан ряд высокоэффективных устройств обработки информации, генерации, синтеза и стабилизации частот, основанных на использовании теоретических и прикладных результатов исследований дискретных СФС. Технические решения, лежащие в основе созданных устройств, защищены 13 авторскими свидетельствами. К числу их относятся синтезаторы частоты дециметрового диапазона на основе комбинированных импульсно-цифровых систем частотно-фазовой автоподстройки, синтезаторы частоты дециметрового диапазона на основе двухкольцевых связанных СФС, возбудители ЧМ-колебаний дециметрового диапазона на основе дискретных колец с циклическим прерыванием режима автоподстройки, цифровые синхронно-фазовые демодуляторы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Книга

1. Казаков Л.Н. Анализ дискретных ФАС 2-го порядка / В кн. Шахтарина Б.И. Анализ систем синхронизации методом усреднения. М.: Радио и связь, 1999. С.343-353.

Казаков Л.Н., Пономарев Н.Ю. Применение качественно-аналитических методов для анализа нелинейной динамики дискретной ФАС 3-го порядка / Там же . С.365-380.

Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Нелинейная динамика дискретных ФАС 2-го порядка с кусочно-линейной характеристикой детектора / Там же. С.440-467.

Учебные пособия

2. Казаков Л.Н. Математическое моделирование дискретных систем с частотным управлением. – Ярославль. 1993. – 44 с.

3. Казаков Л.Н., Палей Д.Э., Пономарев Н.Ю. Нелинейная динамика дискретных СФС с кусочно-линейной характеристикой детектора. – Ярославль. 1998. – 127 с.

Статьи в центральной печати

4. Казаков Л.Н. Управление переходным процессом в быстродействующем синтезаторе частоты // Радиотехника.1986. №10.– С. 15–18.

5. Казаков Л.Н., Широков Ю.В. Комбинированная система частотно-фазовой автоподстройки с различными периодами дискретизации в кольцах // Электросвязь.1994. №8.– С.4-7.

6. Казаков Л.Н., Пономарев Н.Ю. Устойчивость импульсной системы фазовой синхронизации с треугольной характеристикой детектора // Электросвязь.1994. №8.– С.13-16.

7. Широков Ю.В., Казаков Л.Н. Дискретные связанные системы фазовой синхронизации // Изв. вузов. Радиоэлектроника.1995. №4.–С.17-26.

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

9. Широков Ю.В., Казаков Л.Н. Нелинейная динамика дискретных связанных систем фазовой синхронизации // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. №3–4.–С.217-224.

10. Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Анализ полосы захвата импульсной системы фазовой синхронизации второго порядка // Радиотехника и электроника.1995. Т.40. №5.–С.823-828.

11. Пономарев Н.Ю., Казаков Л.Н. Устойчивость в целом импульсной системы фазовой синхронизации второго порядка с трапецевидной характеристикой детектора // Радиотехника и электроника.1997. Т.42. №12.– С.1459-1464.

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

Депонированные рукописи

13. Казаков Л.Н. Система цифровой частотной автоподстройки для быстродействующих синтезаторов частоты. – Редкол. журн. "Изв. вузов. Радиоэлектроника". Киев. Деп. в ВИНТИ, №1462-85. – 19 с.

14. Казаков Л.Н. Астатическая система цифровой частотной автоподстройки с усредняющим детектором. – Деп. в ВИНТИ, №6871-В86. – 14 с.

15. Казаков Л.Н., Приоров А.Л. Анализ астатической системы цифровой частотной автоподстройки с переменным шагом регулирования. – Деп. в ВИНТИ, №6870-В86. – 18 с.

16. Казаков Л.Н., Морозов Д.К., Смирнов В.Н. Применение микропроцессоров в системе приведения цифровых синтезаторов частоты. – Деп. в ВИНТИ, №10-В87. – 15 с.

17. Казаков Л.Н., Ларионов В.В. Анализ кратковременной нестабильности частоты выходного сигнала многочастотного синтезатора. – Деп. в ВИНТИ, №11-В87. – 16 с.

Статьи в межвузовских сборниках научных трудов

18. Казаков Л.Н., Кренев А.Н. Установка для исследования статистических характеристик флуктуаций фазы. – В межв. сб. "Фазовые и частотные радиотехнические системы и устройства с цифровой обработкой". – Красноярск, КПИ, 1981. – 4с.

19. Казаков Л.Н., Калямин А.Н., Кузьмичев А.В., Соболев А.Б. Характеристики широкополосного кольца ФАПЧ с дополнительной системой стабилизации параметров. – В межв. сб. "Устройства обработки информации". – Таганрог, ТРТИ, 1990. – 7с.

20. Казаков Л.Н., Широков Ю.В. Адаптивная система фазовой синхронизации. – В межв. сб. "Вопросы аналого-цифровой обработки и формирования сигналов". – Ярославль, ЯрГУ, 1992. – 7с.

21. Пономарев Н.Ю., Казаков Л.Н. Нелинейная динамика дискретной системы фазовой синхронизации третьего порядка. – В межв. сб. "Современные проблемы радиофизики и электроники". – Ярославль, ЯрГУ, 1998. – С.102-110.

22. Башмаков М.В., Захаров Д.Е., Казаков Л.Н. Анализ выходного сигнала цифрового синхронно-фазового демодулятора при наличии на входе гармонической помехи. – В межв. сб. "Современные проблемы радиофизики и электроники". – Ярославль, ЯрГУ, 1998. – С.118-125.

Доклады и тезисы докладов на международных НТК

23. Казаков Л.Н., Калямин А.Н., Кириллов М.Ю. Адаптивные системы фазовой синхронизации в устройствах формирования широкополосных ЧМ-колебаний СВЧ диапазона // Синхронизация – 90 : Материалы МНТК, НР Болгария, г. Созопол. 1990. – 13 с.

24. Казаков Л.Н., Широков Ю.В. Исследование адаптивной системы фазовой синхронизации // Нелинейные цепи и сигналы : Материалы между. семинара, г. Москва. 1992. – 10 с.

25. Kazakov L.N., Paley D. Shirokov Yu.V. Nonlinear Dynamics of Interaction Phase Locked-Loop Systems // The Second International Scientific School-Seminar "Dynamic and Stochastic Wave Phenomena", Nizny Novgorod, 21-28 June, 1994. – 1р.

26. Kazakov L.N., Shirokov Yu.V. Nonlinear Dynamics of The Interaction Discrete Phase Locked-Loops // 5-th International Specialist Workshop "Nonlinear Dynamics of Electronic Systems", Moscow, 26-27 June, 1997.– 7p.

27. Kazakov L.N., Paley D.E. Analysis of Stochastic Model of Synchronous-Phase Demodulator with Nonlinear Filter in the Control Circuit // The 1 st International Conference "Digital Signal Processing and Its Applications", Moscow, Russia, June 30 - July 3, V.II-E, 1998.– 6p.

28. Казаков Л.Н., Башмаков М.В. Помехоустойчивость цифрового синхронно-фазового демодулятора с многоуровневым квадратурным преобразованием входного сигнала // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Материалы 2-ой международной конференции, Москва, 21-24 сентября, 1999.– 6с.

29. Казаков Л.Н., Пономарев Н.Ю., Казаков А.Л. Цифровой синхронно-фазовый демодулятор на основе ЦСФС 3-го порядка // Цифровая обработка сигналов и ее применение : Материалы 2-ой международной конференции, Москва, 21-24 сентября, 1999.– 7с.

Доклады и тезисы докладов на российских НТК

30. Казаков Л.Н. Управление динамическим режимом в быстродействующем синтезаторе частоты // Проблемы повышения эффективности и качества систем синхронизации : тез. докл. ВНТК, г. Львов, 1985.– 2с.

31. Казаков Л.Н., Ларионов В.В. Анализ астатической системы ЦЧАП с переменным периодом регулирования // Развитие и совершенствование устройств синхронизации в системах связи : тез. докл. ВНТК, г. Горький, 1988.– 2с.

32. Казаков Л.Н., Кириллов М.Ю., Калямин А.Н., Кузьмичев А.В. Исследование динамики системы ИФАП с кольцом цифровой памяти // Стабилизация частоты : тез. докл. межотр. научных конференций, совещаний, семинаров, г. Канев, 1989.– 2с.

33. Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Анализ дискретной СФС третьего порядка // тез. докл. XLVIII вт.: научной сессии, посвященной Дню Радио, г. Москва, 1993.– 2с.

34. Казаков Л.Н., Палей Д.Э. Анализ двумерного отображения системы фазовой синхронизации с двумя нелинейностями // Нелинейные колебания механических систем : тез. докл. ВНТК, г. Н.Новгород, 1993.– 1с.

35. Казаков Л.Н., Палей Д.Э., Пономарев Н.Ю. Синтезатор частоты с улучшенными спектральными характеристиками // Направления развития систем и средств радиосвязи : Материалы ВНТК, г. Воронеж, 1996.– 6с.

36. Казаков Л.Н., Захаров Д.Е., Палей Д.Э. Устойчивость дискретной СФС с нелинейным фильтром при наличии шума // Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация : Материалы ВНТК, г. Воронеж, 1997.– 7с.

37. Казаков Л.Н., Палей Д.Э, Пономарев Н.Ю. Сравнительный анализ нелинейной динамики дискретных автономных СФС 2-го и 3-го порядков // тез. докл. LIV научной сессии, посвященной Дню Радио, г. Москва, 1999.– 3с.

38. Казаков Л.Н., Башмаков М.В., Смирнов О.Ю. Оценка областей существования колебательных режимов дискретных СФС с кусочно-линейной характеристикой детектора // тез. докл. LIV научной сессии, посвященной Дню Радио, г. Москва, 1999.– 2с.

Авторские свидетельства на изобретения

39. А.с. № 658755 (СССР). Имитатор многолучевого радиоканала. – Б.И. 1979. №15. / Авт.: Ярмоленко В.И., Смирнов В.Н., Казаков Л.Н., Кренев А.Н.

40. А.с. № 959269 (СССР). Программируемый генератор сигналов.– Б.И. 1982. №34. / Авт.: Кренев А.Н., Казаков Л.Н., Смирнов В.Н., Новиков Е.Н.

41. А.с. № 962997 (СССР). Функциональный генератор.– Б.И. 1982. №35. / Авт.: Казаков Л.Н., Кренев А.Н.

42. А.с. № 1013904 (СССР). Измеритель временных интервалов.– Б.И. 1984. №13. / Авт.: Казаков Л.Н., Кренев А.Н.

43. А.с. № 1104541 (СССР). Генератор сигналов. – Б.И. 1984. №27. / Авт.: Казаков Л.Н., Коропец А.И.

44. А.с. № 1252939 (СССР). Цифровой синтезатор частоты. – Б.И. 1986. №31. / Казаков Л.Н.

45. А.с. № 1345343 (СССР). Синтезатор частоты с частотной модуляцией. – Б.И. 1987. №38. / Авт.: Казаков Л.Н., Смирнов В.Н., Якунин А.В.

46. А.с. № 1418898 (СССР). Синтезатор частоты. – Б.И. 1988. №31. / Авт.: Казаков Л.Н., Калямин А.Н.

47. А.с. № 1478328 (СССР). Синтезатор частот. – Б.И. 1989. №17. / Авт.: Казаков Л.Н., Самойло К.А., Смирнов В.Н.

48. А.с. № 1483588 (СССР). Формирователь частотно-модулированных сигналов. –Б.И. 1989. №20. / Авт.: Казаков Л.Н., Смирнов В.Н., Якунин А.В.

49. А.с. № 1525913 (СССР). Устройство подстройки частоты генератора с частотной модуляцией. – Б.И. 1989. №44. / Авт.: Казаков Л.Н., Калямин А.Н., Смирнов В.Н., Якунин А.В.

50. А.с. № 1543544 (СССР). Цифровой синтезатор частоты с частотной модуляцией.–Б.И. 1990. №13. / Авт.: Казаков Л.Н., Калямин А.Н., Кириллов М.Ю. Ларионов В.В.

51. А.с. № 1566458 (СССР). Устройство автоподстройки частоты генератора с частотной модуляцией. – Б.И. 1990. №19. / Авт.: Казаков Л.Н., Калямин А.Н., Кириллов М.Ю.

Подписано в печать 16.12.99. Формат 60×84/16.
Заказ 148. Тираж 100 экз.

Отпечатано в техническом центре
Ярославского государственного университета
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.