

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 681.511.4

КУКИН
Дмитрий Петрович

**АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления»

Минск 2009

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

ШИЛИН Леонид Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

КУРЕНЕВ Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматического управления учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

КУЗЬМИЦКИЙ Иосиф Фелицианович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация

Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт средств автоматизации»

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время принципы фазового управления находят широкое применение в различных областях современной техники. В частности, при реализации когерентных методов приема сигналов обязательным элементом является фазовая синхронизация, формирующая опорный сигнал из принимаемого колебания. Проблема фазовой синхронизации остро встала в связи с бурным развитием цифровых сетей связи. Устройства фазовой синхронизации (УФС) широко используются в технике связи благодаря их значительным возможностям по обеспечению битовой синхронизации и демодуляции сигналов с частотной и фазовой модуляцией. При этом цифровые УФС (ЦУФС) характеризуются повышенной надёжностью и меньшей стоимостью по сравнению с аналоговыми. Кроме того, ЦУФС характеризуются относительной простотой изготовления и настройки. Несмотря на значительные преимущества, применение ЦУФС затруднено сложностью математических расчетов, необходимых для осуществления синтеза этого класса систем, что обусловлено значительной нелинейностью и дискретностью структурных блоков устройства. Существующие на данном этапе развития теории нелинейных цифровых систем аналитические методы расчета дают приближенный, в известной степени, результат, что не может в полной мере удовлетворить потребности современного высокотехнологичного производства.

На современном этапе наука характеризуется всесторонним развитием теории аналоговых систем фазовой синхронизации. Большинство литературных источников предлагает проводить изучение подобных устройств по линеаризованным моделям. Такой метод позволяет значительно упростить расчеты при проведении разнообразных приближенных исследований УФС. Однако для аутентичности получаемых результатов необходим иной метод математического описания рассматриваемых систем, учитывающий как дискретность, так и нелинейность устройства в целом и его составных блоков в частности. Диссертационная работа посвящена разработке точных методов моделирования ЦУФС, позволяющих учитывать наиболее широкий спектр процессов, происходящих в исследуемом устройстве, его дискретные и нелинейные особенности. В работе раскрыты наиболее существенные вопросы теории цифрового моделирования и произведен вывод универсальной цифровой модели ЦУФС. Построение высокоточных моделей ЦУФС, всесторонне описывающих аспекты функционирования устройства, позволяет наряду с разработкой методов синтеза систем, обладающих наилучшими характеристиками с точки зрения быстродействия и качества, производить коррекцию их алгоритмов функционирования с целью улучшения динамических свойств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедры «Теоретические основы электротехники» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ ГБЦ № 05-3082 «Квазиоптимальный синтез дискретных систем с фазовым управлением» (2005–2006 гг.), ГБЦ № 06-3128 «Анализ и синтез многоцелевой системы определения качества и объема руды на предприятиях добывающей и перерабатывающей отраслей Республики Беларусь» (2006–2007 гг.), ГБЦ № 06-3066 «Разработка методов анализа, синтеза, алгоритмов программного обеспечения и создание высокоэффективных систем автоматизации на основе современных информационных технологий и программно-аппаратных комплексов» (2006–2010 гг.), выполненной по ГКПНИ «Механика» (задание 3.2.31), включенной в План важнейших научно-исследовательских работ в области естественных, технических, гуманитарных и социальных наук Республики Беларусь на 2006-2010 гг., утвержденный постановлением президиума НАН Беларуси № 20 от 24.02.2006 г.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка машинно-ориентированных методов анализа и параметрического синтеза цифровых устройств фазовой синхронизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель ЦУФС, учитывающую нелинейность и дискретность, характерные для составных блоков устройства, и позволяющую производить всесторонний анализ как статических, так и динамических характеристик;
- оценить устойчивость ЦУФС в различных режимах работы;
- рассчитать области параметров ЦУФС, для которых процессы в устройстве удовлетворяют желаемым требованиям;
- разработать алгоритмы параметрического синтеза ЦУФС с требуемыми характеристиками работы;
- разработать способы улучшения динамических характеристик ЦУФС.

Объектом исследования являются цифровые системы фазовой синхронизации. Предмет исследования – способы улучшения статических и динамических характеристик ЦУФС.

Положения, выносимые на защиту

1. Имитационная модель ЦУФС, разработанная на основе предложенной математической модели, позволяет впервые исследовать устройство в различных режимах работы с учетом его нелинейных и дискретных свойств. Модель предоставляет возможность наблюдать основные динамические характеристики системы, что в свою очередь позволяет оценивать преимущества и недостатки составных блоков ЦУФС. Математическая модель ЦУФС, лежащая в основе имитационной модели, является машинно-ориентированной. Способ математического описания ЦУФС позволяет моделировать составные блоки устройства. Синтезирован алгоритм составления математической модели линейного или линеаризованного блока ЦУФС произвольной сложности.

2. Инженерные методы построения областей устойчивости ЦУФС. Методы позволяют производить анализ существующих ЦУФС в различных режимах работы, оценивать как статические, так и динамические характеристики.

3. Алгоритмы параметрического синтеза, впервые сформулированные для ЦУФС, учитывают требования по устойчивости, быстродействию и точности.

4. Способ увеличения быстродействия ЦУФС при помощи нелинейного корректирующего устройства с динамическим коэффициентом усиления.

Личный вклад соискателя

Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором. Вклад научного руководителя Л. Ю. Шилина заключается в постановке цели и задач исследования, а также в участии в разработке математических моделей ЦУФС. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: 11-я всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2004» (Зеленоград, 2004); 7-я Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Новые ма-

тематические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, 2004); Международная научно-техническая конференция «Проблемы управления и приложения (техника, производство, экономика)» (Минск, 2006); 4-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2006); Международная научно-практическая конференция «Техника и технологии: инновации и качество» (Минск, 2007); 4-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ – 2008»» (Севастополь, 2008); Международная научно-практическая конференция «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» (Минск, 2008); Международная научно-техническая конференция «Моделирование – 2008» (Киев, 2008).

Опубликованность результатов диссертации

По тематике представленной диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы, из них 6 статей в республиканских и международных научных журналах, 15 тезисов докладов на научно-технических конференциях, 1 заявка на изобретение. Результаты работы включены в 3 отчета о НИР.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 7 авторских листов.

Структура и объем диссертации

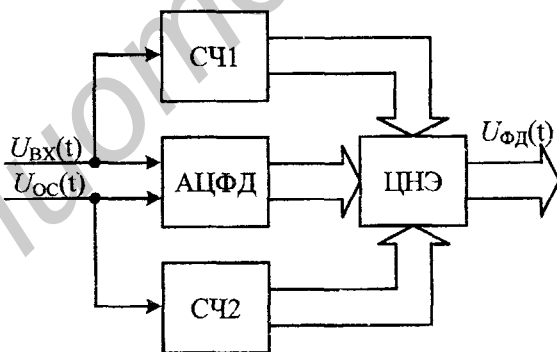
Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, дается обоснование круга рассмотренных вопросов. В **первой главе** проведен анализ структуры и функциональных принципов построения современных ЦУФС. Предложен способ построения математической модели составных блоков рассматриваемого класса систем. Кроме того, выдвинуты рекомендации по реализации различных функциональных возможностей блоков устройства современными техническими средствами. Во **второй главе** предложен принцип построения имитационной модели ЦУФС, которая в значительной степени упрощает как процесс анализа, так и процесс синтеза рассматриваемых систем. В **третьей главе** предложены способы анализа различных характеристик ЦУФС, в результате применения которых построены области параметров, необходимые для параметрического синтеза систем. В **четвертой главе** дано описание разра-

ботанных последовательностей параметрического синтеза ЦУФС, а также авторских способов улучшения динамических характеристик синтезируемого устройства. В **приложении** приведены акты внедрения диссертационной работы и решение Национального центра интеллектуальной собственности по заявке № а20080828 на выдачу патента Республики Беларусь на изобретение.

Полный объем диссертации составляет 131 страницу, в том числе 43 рисунков на 14 страницах, библиографический список из 183 наименований на 13 страницах, 1 приложение на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** проведен обзор различных вариантов структурного построения ЦУФС, приведена их классификация. Проанализированы преимущества и недостатки выделенных классов устройств. Сформулированы рекомендации по использованию тех или иных вариантов структурных схем. Рассмотрены принципы построения, функциональное назначение и основные характеристики составных блоков ЦУФС. Установлено, что при синтезе ЦУФС разумным является сочетание как программных, так и аппаратных методов реализации различных блоков [14–А]. Примером такого сочетания является структурная схема цифрового фазового дискриминатора (ЦФД), приведенная на рисунке 1.



СЧ1 и СЧ2 – двоичные счетчики; АЦФД – аппаратный ЦФД;
ЦНЭ – цифровой нелинейный элемент

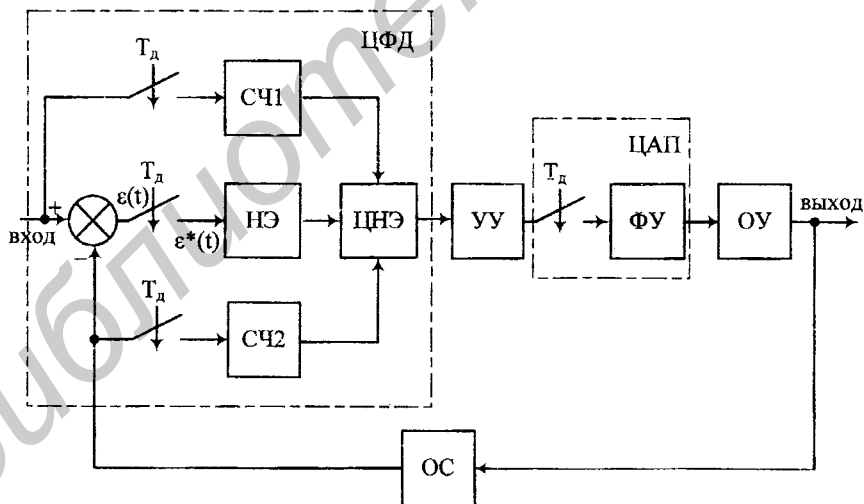
Рисунок 1 – Программно-аппаратный ЦФД

СЧ1 и СЧ2 применяются для оцифровки входной и опорной последовательностей импульсов. ЦНЭ в данном случае реализуется программным способом и используется для формирования желаемой дискриминационной характе-

ристики на основании полученной информации от СЧ1, СЧ2 и АЦФД. На выходе блока формируется кодовая последовательность, содержащая информацию как о выявленном фазовом рассогласовании, так и о длительности периодов следования входного и опорного импульсов. Структура ЦФД, приведенная на рисунке 1, значительно уменьшает влияние недостатков аппаратных ЦФД на работу системы. Понижение быстродействия блока, связанное с применением микроЭВМ, является незначительным, что обусловлено малым количеством операций, реализуемых программным методом [7–А].

Кроме того, в первой главе проанализированы особенности существующих на данный момент методов математического описания ЦУФС, выявлены их характерные особенности [1–А]. Предложен способ математического моделирования линейной части ЦУФС. Получено рекурсивное уравнение, позволяющее моделировать составные блоки устройства. Разработан алгоритм составления математической модели линейного или линеаризованного блока ЦУФС произвольной сложности. Составлена модель линеаризованной ЦУФС.

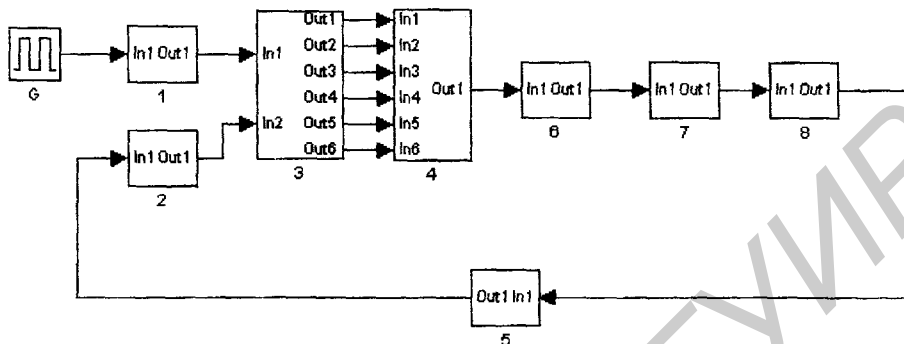
Во второй главе проведен обзор методов моделирования ЦУФС на ЭВМ [9–А]. Обоснован выбор имитационного метода моделирования [8–А]. Описана последовательность построения имитационной модели ЦУФС на рисунке 2. Обоснован выбор в качестве средства реализации модели системы MATLAB.



НЭ – нелинейный элемент; ЦНЭ – цифровой нелинейный элемент;
 УУ – устройство управления; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
 ФУ – формирующее устройство; ОУ – объект управления; ОС – обратная связь

Рисунок 2 – Структурная схема ЦУФС

Структурная схема имитационной модели ЦУФС [20–А] приведена на рисунке 3.



1, 2 – формирователи; 3, 4 – последовательно подключенные блоки, при взаимодействии которых осуществляется моделирование ФД в сочетании с УУ; 5 – ОС; 6 и 7 – ОУ; 8 – вычисляющий блок, осуществляющий определение выходной переменной ОУ, имеющей синусоидальный характер; G – генератор, моделирующий входное колебание, преобразованное в последовательность прямоугольных импульсов

Рисунок 3 – Схема имитационной модели ЦУФС

Показана состоятельность предлагаемого подхода при моделировании ЦУФС путем анализа результатов моделирования как отдельных блоков, так и системы в целом в статическом и динамическом режимах работы устройства [5–А]. Сделан вывод о том, что полученная модель предоставляет возможность наблюдать основные динамические характеристики системы, что в свою очередь позволяет оценивать преимущества и недостатки составных блоков ЦУФС. Кроме того, модель позволяет производить построение фазовой траектории системы и переходного процесса, в результате чего имеется возможность осуществить оценку устойчивости системы и параметров, определяющих качественные характеристики ЦУФС.

Произведен сравнительный анализ статических и динамических характеристик, получаемых при моделировании ЦУФС описанным способом, с характеристиками цифровых устройств, реализованных на технической базе СП «Бевалекс». Расхождение соответствующих характеристик при эквивалентности параметров сравниваемых систем не превысило 3 % по абсолютной величине. На основании этого сделан вывод о достаточной точности совпадения результатов моделирования с характеристиками реальных систем, и, как следствие, об эффективности предложенного способа моделирования ЦУФС. Разработанная модель позволяет производить анализ существующих ЦУФС с целью их модернизации. Также имеется возможность разрабатывать ЦУФС, исходя из предъявляемых требований и решаемых задач.

В третьей главе проанализированы принципы и физическая сущность процессов, протекающих в ЦУФС. Разработана последовательность анализа устойчивости ЦУФС «в малом», основанная на принципах теории автоматического управления, позволяющих исследовать устойчивость ЦУФС, а также ее статические и динамические характеристики [3–А]. В рамках устойчивости «в малом» рассмотрен квазилинейный режим работы исследуемой системы, что является необходимым и достаточным для анализа рассматриваемого вида устойчивости. В результате получена следующая передаточная функция разомкнутой системы:

$$K_p(z) = \frac{K_c \cdot z \cdot \left(H_c \cdot z - H_c + 1 - e^{-\frac{T}{T_{\text{од}}}} \right)}{(z-1)^2 \cdot \left(z - e^{-\frac{T}{T_{\text{од}}}} \right)}$$

Далее в результате применения критериев устойчивости получены условия сходимости переходного процесса в исследуемой системе. На основании полученных условий устойчивости построены зависимости $K_c = f(H_c)$ при заданных значениях T и $T_{\text{ФД}}$, называемые областями устойчивости системы. Пример такой области построен на рисунке 4 для значений $T = 0,00001$ и $T_{\text{ФД}} = 0,15$. В результате получена область параметров разрабатываемого устройства, для которых переходной процесс в системе будет сходящимся.

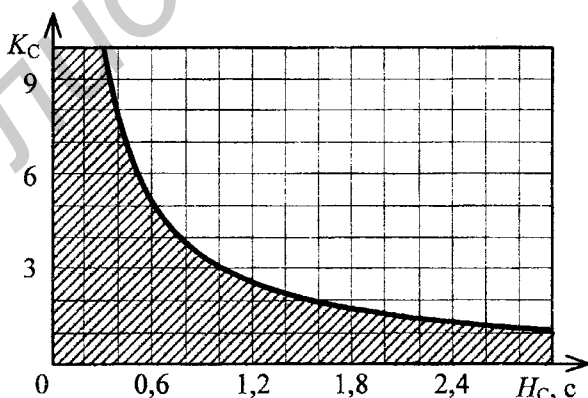
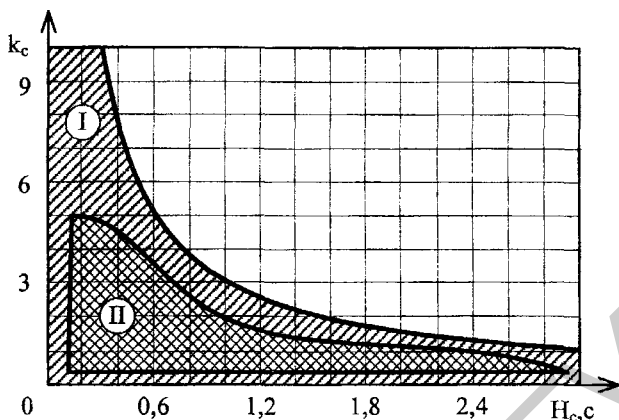


Рисунок 4 – Пример области устойчивости ЦУФС

Моделирование ЦУФС в квазилинейном режиме работы с различными параметрами показывает, что вне полученной области переходной процесс имеет вид, свидетельствующий о неустойчивости системы автоматического управления. В то же время при использовании в процессе моделирования параметров, принадлежащих области устойчивости, переходной процесс имеет сходный характер. Однако приближение к границам рассчитанной области приводит к потере устойчивости, что несколько сужает реальное пространство допустимых параметров. Такое расхождение не превышает 10%. Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный способ предварительного выбора параметров системы применим в рамках решаемой задачи, и значительно упрощает процесс анализа ЦУФС.

Произведен анализ устойчивости ЦУФС «в большом». Установлено, что для этого наиболее целесообразным является применение метода имитационного моделирования системы с учетом нелинейности и дискретности как системы в целом, так и ее составных блоков. Упомянутый метод обладает значительными преимуществами по сравнению с аналитическими, анализ которыми в значительной степени усложняется для систем выше первого порядка, а также связан с применением в известной степени упрощенных и приближенных вычислений. В то же время имитационные модели являются в значительной степени более универсальными, однако требуют для расчета больших вычислительных затрат. Таким образом, процесс анализа устойчивости ЦУФС «в большом» сведен к многократному моделированию системы с различными параметрами составных блоков [4–А].

В качестве примера применения передоложенной методики рассмотрен анализ устойчивости «в большом» для ЦУФС с параметрами, использованными ранее. В результате моделирования указанной системы получена область устойчивости, которая приведена на рисунке 5. Сделаны выводы о том, что полученная в данном пункте область устойчивости адекватно характеризует переходные процессы, протекающие в ЦУФС, а также рассчитанная область устойчивости «в малом» полностью включает в себя область, полученную в данном пункте. Следовательно, способ анализа устойчивости ЦУФС «в малом» удобно использовать для построения предварительной области устойчивости системы с целью ограничения области параметров, применяемых при анализе устойчивости «в большом», что в значительной степени сократит требуемые последним методом вычислительные затраты. В результате проведенных исследований сделан вывод о том, что последовательное применение описанных способов анализа оправдано как с точки зрения вычислительных затрат, так и с позиции достижения требуемой точности построения областей устойчивости анализируемой ЦУФС.



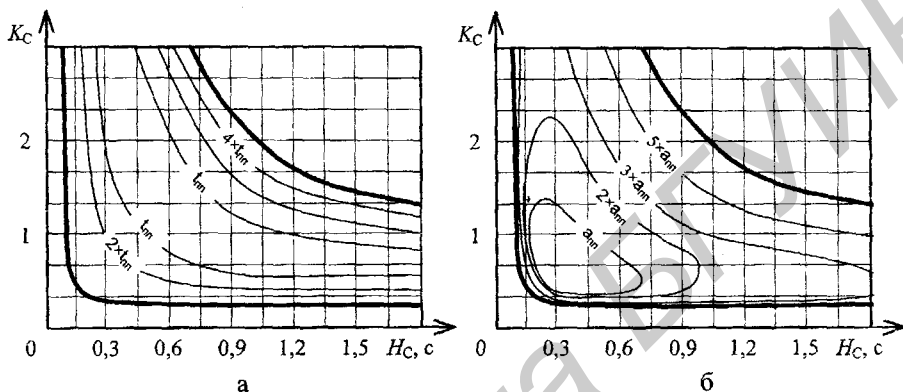
I – область устойчивости, полученная при анализе устойчивости «в малом»; II – область устойчивости, полученная при имитационном моделировании системы

Рисунок 5 – Примеры областей устойчивости ЦУФС

Таким образом, предложен инженерный метод анализа существующих ЦУФС в различных режимах работы, позволяющий оценивать как статические, так и динамические характеристики. Данный метод также, позволяет производить выбор параметров устройства путем построения областей устойчивости с целью его модернизации для улучшения свойств системы, а также параметрического синтеза системы. Эти выводы в полном объеме подтверждаются проверкой полученных областей устойчивости на тестовом стенде СП «Бевалекс». В результате проведенных измерений установлено, что при выборе параметров из рассчитанных областей устройство является устойчивым, а границы практической области устойчивости отличаются от рассчитанных на 6,5 %. Последнее обстоятельство может быть обусловлено упрощенным методом аппроксимации границ рассчитанных областей. Однако очевидно, что полученная последовательность анализа устойчивости позволяет решать поставленные задачи с достаточной точностью и может быть использована в дальнейшем при параметрическом синтезе ЦУФС.

В четвертой главе разработан способ параметрического синтеза цифровых систем фазовой синхронизации, учитывающий широкий спектр требований [2–А, 6–А, 16–А, 17–А, 19–А, 22–А]. В рамках разработанного способа составлены алгоритмы и приведено подробное описание всех их этапов. Кроме того, предложен способ выбора параметров аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей, позволяющий получить выражения для построения диаграмм качества для разных структурных схем и параметров ЦУФС. Предложенные алгоритмы параметрического синтеза предполагают построение облас-

тей качества в параметрах проектируемого устройства. Предполагается производить построение следующих семейств областей: областей качества по быстродействию, характеризующих длительность переходного процесса, получаемых в ходе анализа устойчивости средствами имитационного моделирования (рисунок 6, а); областей качества по точности, отражающих результат построения диаграмм качества аналитическим способом (рисунок 6, б).



t_m – единичная длительность переходного процесса, равная для рассматриваемого примера 1 мс; a_m – единичная амплитуда колебаний в установившемся процессе, в данном случае 2 Гц

Рисунок 6 – Примеры областей устойчивости ЦУФС

Совмещение полученных областей качества дает возможности осуществлять выбор параметров синтезируемого устройства как с точки зрения быстродействия, так и с точки зрения точности.

Эффективность предложенных алгоритмов проверена при разработке тестирующего устройства для микропроцессоров на основе ЦУФС в СП «Бева-лекс». В процессе разработки указанного устройства были применены алгоритмы и способы параметрического синтеза, реализованные в пакете прикладного программного обеспечения, разработанного для автоматизированного параметрического синтеза ЦУФС. О результатах применения указанного пакета программ имеется акт внедрения, свидетельствующий о значительном сокращении затрат при проектировании, внедрении и техническом обслуживании цифровых устройств. Кроме того, предложенные алгоритмы использованы для модернизации существующей системы автоматической загрузки руды в бункеры СОФ ЗРУ ПО «Беларуськалий», о чем также свидетельствует соответствующий акт внедрения. Подробно описана последовательность построения диаграмм качества для одного из возможных вариантов структуры ЦУФС. Построенные в результате диаграммы являются основанием при выборе наилучших параметров системы.

Рассмотрены существующие методы улучшения динамических характеристик ЦУФС, выявлены их характерные особенности, преимущества и недостатки [10–А, 11–А, 12–А, 13–А, 15–А]. Разработаны авторские способ и устройство (подана заявка на изобретение) для улучшения динамических характеристик ЦУФС при помощи нелинейного корректирующего устройства (НКУ) с динамическим коэффициентом усиления [18–А, 20–А].

В рамках упомянутого способа предложен следующий алгоритм функционирования НКУ:

Шаг 1. Определение цифровых эквивалентов длительности половин периодов входного и подстраиваемого колебаний.

Шаг 2. Сравнение полученных выше числовых эквивалентов и определение $\Delta T = |T_{ВХ} - T_{П}|$; где $T_{ВХ}$ – половина периода входного сигнала, а $T_{П}$ – половина периода подстраиваемого сигнала.

Шаг 3. В том случае, когда ΔT превосходит некоторое заранее установленное граничное значение $\Delta T'$, а следовательно, частота сигнала на выходе ЦУФС выходит за рамки заранее установленного интервала $\Delta\omega$ вблизи частоты входного колебания, тогда производится замена управляющего сигнала ЦУФС, пропорционального выявленному фазовому рассогласованию, на максимальный сигнал управления ОУ со знаком, соответствующим характеру разности между величинами $T_{ВХ}$ и $T_{П}$. Такая замена вводится для максимально быстрого попадания частоты подстраиваемого сигнала в упомянутый выше интервал.

Шаг 4. Если ΔT меньше $\Delta T'$, тогда замена управляющего сигнала не производится.

Шаг 5. Возврат к первому шагу алгоритма.

Ширину интервала вблизи частоты входного колебания, упомянутого на третьем шаге алгоритма, необходимо выбирать не менее утроенного значения, на которое изменится частота выходного колебания при воздействии на вход ОУ максимального управляющего сигнала в течение времени, необходимого для оцифровки величины $T_{П} = T_{ВХ}$: В противном случае система, со значительной долей вероятности, пропустит установленный интервал, и переключения на управляющий сигнал не будут производиться вообще. В рамках данного способа предложена обобщенная структурная схема ЦУФС с НКУ, показанная на рисунке 7. В приведенной схеме канал α предназначен непосредственно для выявления фазового рассогласования между входным сигналом системы и подстраиваемым колебанием, в то время как каналы β и γ используются в рамках определения цифровых эквивалентов длительности половин периодов упомянутых колебаний, что необходимо для реализации разработанного алгоритма функционирования ЦУФС с НКУ. На входы решающего устройства (РУ) подаются двоичные сигналы от каналов β и γ , содержащие информацию о величинах

нах длительностей половин периодов входного и подстраиваемого колебаний. РУ производит вычисление ΔT согласно приведенному ранее алгоритму. Затем описываемый блок принимает решение о необходимости нелинейной коррекции управляющего сигнала. Выходным сигналом РУ является последовательность импульсов, непосредственно управляющих корректирующим блоком $[F_1^{t_2}]$. Символ $[F_1^{t_2}]$ обозначает, что во время переходного процесса на некотором интервале времени Δt (от t_1 до t_2) управляющий сигнал заменяется на некоторый сигнал F .

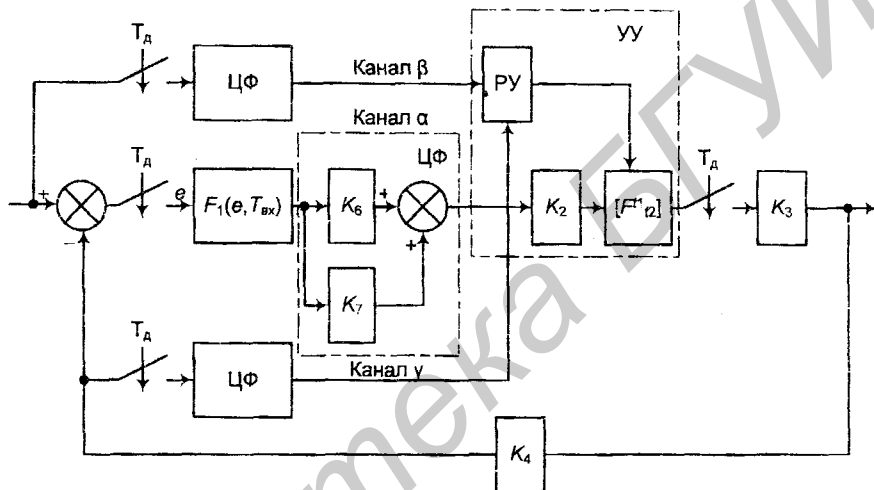


Рисунок 7 – Обобщенная структурная схема ЦУФС с НКУ

В данном случае в качестве сигнала F выступает максимально допустимое управляющее воздействие на ОУ. Значения t_1 и t_2 задаются началом и окончанием одного шага алгоритма функционирования УУ, выполняющего функции нелинейной коррекции.

Дальнейшее исследование системы с различными параметрами и при разнообразных начальных условиях показало, что вид переходных характеристик зависит не только от момента переключения управляющего сигнала с максимального значения на зависимость, сформированную пропорционально выявленному фазовому рассогласованию (т. е. от ширины интервала $\Delta\omega$), и параметров системы, но и от продолжительности периода времени Δt , в течение которого производилась замена управляющего сигнала. Установлено, что величина Δt оказывает значительное влияние на коэффициент усиления системы, необходимый для сходимости переходного процесса. Таким образом, была выявлена необходимость вычисления динамического коэффициента усиления K_{yy}

УУ, который изменяется в зависимости от Δt и корректирует общий коэффициент усиления ЦУФС. В результате проведенных исследований было получено выражение для вычисления динамического коэффициента усиления УУ, а также уточнен алгоритм функционирования ЦУФС с НКУ.

Структурная схема синтезированной ЦУФС с НКУ приведена на рисунке 8. Цифровое моделирование предложенной структурной схемы показало, что применение НКУ значительно (до 10 раз) сокращает длительность переходного процесса. При этом указанная особенность проявляется тем сильнее, чем значительнее фазовое рассогласование входного и подстраиваемого сигналов.

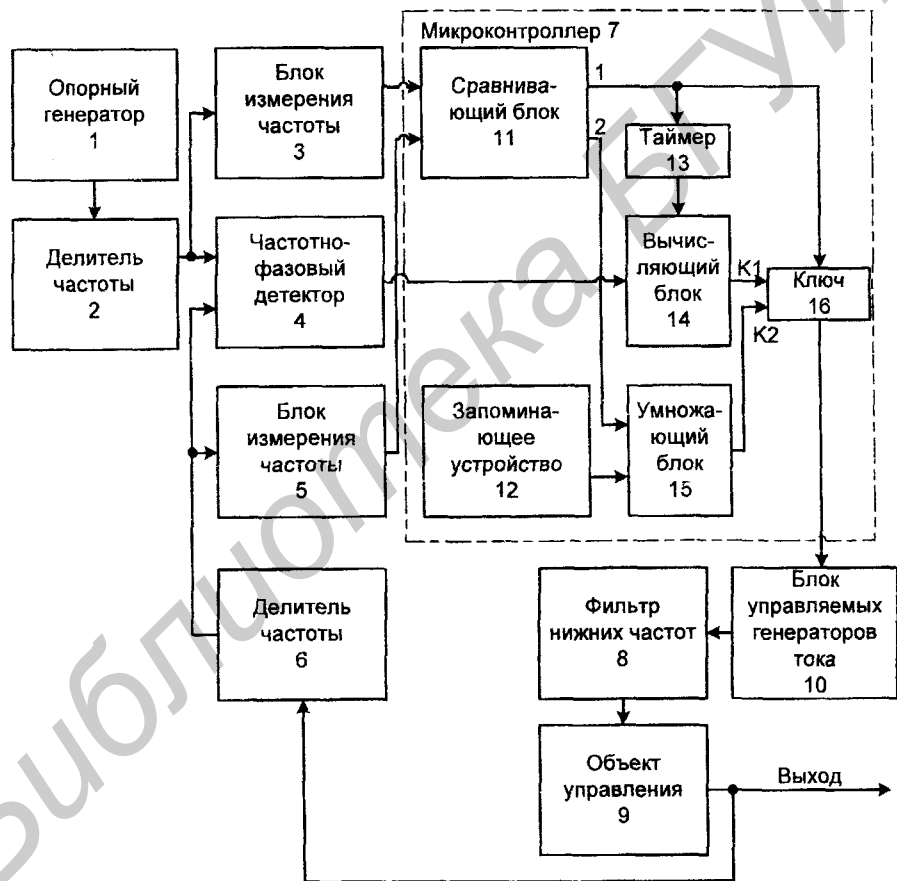


Рисунок 8 – Структурная схема ЦУФС с НКУ

Новизна предлагаемого способа улучшения динамических характеристик ЦУФС заключается в следующем:

- в цепи управления использовано нелинейное корректирующее устройство, при значительном рассогласовании частот заменяющее управляющий сигнал на максимально допустимый, что позволяет производить перестройку частоты с максимальной скоростью;

- применен динамический коэффициент усиления, вычисляемый по оригинальной формуле, который позволяет в значительной степени унифицировать систему, сделать ее значительно более широкополосной и универсальной в плане выбора объекта регулирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В соответствии с поставленной целью и очерченным кругом задач получены следующие научные и практические результаты:

1. Последовательность математического моделирования линейной части ЦУФС. Исследованы возможности различных способов для определения наиболее точного метода перехода от обычного к дискретному преобразованию Лапласа. Получено рекурсивное уравнение, позволяющее моделировать составные блоки устройства. Разработан алгоритм составления математической модели линейного или линеаризованного блока ЦУФС произвольной сложности. Составлена математическая модель линейной или линеаризованной ЦУФС [1–А, 7–А, 14–А].

2. Имитационная модель ЦУФС, позволяющая изменять параметры составных блоков системы, в том числе и частоту дискретизации. Предложенная модель позволяет производить построение фазовой траектории и переходного процесса, в результате чего имеется возможность осуществить оценку устойчивости системы и степень влияния параметров, определяющих качественные характеристики ЦУФС. Модель позволяет производить анализ существующих ЦУФС с целью их модернизации, а также предоставляет возможность разрабатывать ЦУФС исходя из предъявляемых требований и решаемых задач. В отличие от известных аналогов разработанная модель является высокоточной цифровой моделью, позволяющей исследовать ЦУФС в различных режимах работы и учитывающей дискретные и нелинейные свойства устройства [5–А, 8–А, 9–А, 20–А].

3. Инженерные методы анализа устойчивости ЦУФС, результатом применения которых является построение соответствующих областей устойчивости. Предложена последовательность анализа ЦУФС в различных режимах работы, позволяющая оценивать как статические, так и динамические характери-

стики [3–А, 4–А].

4. Метод параметрического синтеза цифровых систем фазовой синхронизации, учитывающий широкий спектр требований. Предложена эффективная последовательность выбора параметров составных блоков проектируемого устройства на основе построения областей качества по быстродействию и по точности в параметрах системы. Синтезирована последовательность построения диаграмм качества разных структурных схем ЦУФС. Разработаны авторский способ и устройство для улучшения динамических характеристик ЦУФС при помощи нелинейного корректирующего звена с динамическим коэффициентом усиления [2–А, 6–А, 10–А, 11–А, 12–А, 13–А, 15–А, 16–А, 17–А, 18–А, 19–А, 22–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Программное обеспечение и способы построения ЦУФС, разработанные в ходе диссертационной работы, могут применяться при анализе и параметрическом синтезе ЦУФС широкого назначения, например, для создания низкочастотных синтезаторов частоты, прецизионных систем стабилизации вращения вала двигателя, перестраиваемых фильтров, работающих в килогерцовом и мегагерцовом диапазоне частот. Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в ГКП НИ «Механика» и ряде других НИР, а также в составе прикладных устройств. В частности, они используются и внедрены в производство в СП «Бевалекс», в технологический процесс на ПО «Беларуськалий», а также используются в учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре теоретических основ электротехники в курсе «Основы автоматизированного проектирования электрических цепей».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1–А. Кукин, Д.П. Моделирование цифровых систем фазовой синхронизации / Д.П. Кукин, А.А. Дерюшев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/2. – С. 96–99.

2–А. Дерюшев, А.А. Синтез импульсных устройств фазовой синхронизации с различными алгоритмами переключения структуры и параметров / А.А. Дерюшев, Д.П. Кукин, С.В. Батюков // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 1(17)/2. – С. 64–72.

3–А. Кукин, Д.П. Исследование устойчивости цифровых систем фазовой синхронизации / Д.П. Кукин, А.А. Дерюшев // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 2(20)/1. – С. 108–111.

4–А. Кукин, Д.П. Исследование цифровых систем фазовой синхронизации / Д.П. Кукин, Л.Ю. Шилин // Доклады БГУИР. – 2005. – № 4 (12). – С. 41–47.

5–А. Яковлева, Н.А. Детерминированный хаос в системах фазовой синхронизации / Н.А. Яковлева, Д.П. Кукин // Инженерный вестник. – 2006. – № 1 (21)/3. – С. 24–27.

6–А. Олиферович, Д.С. Элементы синтеза цифровых систем фазовой синхронизации / Д.С. Олиферович, Д.П. Кукин, П.А. Мигутский // Инженерный вестник. – 2006. – № 1 (21)/2. – С. 75–77.

Материалы научно-технических конференций

7–А. Дерюшев, А.А. Параметрический синтез импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемой структурой и параметрами / А.А. Дерюшев, Д.П. Кукин // Микроэлектроника и информатика – 2004: тез. докл., Зеленоград, 21–23 апр. 2004 г. / Моск. гос. ин-т электронной техники. – М., 2004. – С. 78.

8–А. Кукин, Д.П. Моделирование цифровых систем фазовой автоподстройки частоты / Д.П. Кукин, А.А. Дерюшев // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VII респ. науч. конф. студ. и асп. / Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2004. – С. 21–22.

9–А. Дерюшев, А.А. Исследование импульсных устройств фазовой синхронизации с повышенным быстродействием / А.А. Дерюшев, Л.Ю. Шилин, Д.П. Кукин // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VII респ. науч. конф. студ. и асп. / Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2004. – С. 87–88.

10–А. Кукин, Д.П. Анализ систем фазовой синхронизации посредством имитационного моделирования / Д.П. Кукин, А.А. Дерюшев // Проблемы

управления и приложения (техника, производство, экономика): тез. докл. Междунар. НТК. – Минск: БНТУ, ИМ НАНБ, 2006. – С. 153–154.

11–А. Свито, И.Л. Проектирование импульсных устройств фазовой синхронизации с улучшенными динамическими характеристиками / И.Л. Свито, А.А. Дерюшев, Д.П. Кукин // Проблемы управления и приложения (техника, производство, экономика): тез. докл. Междунар. НТК. – Минск: БНТУ, ИМ НАНБ, 2006. – С. 153–154.

12–А. Шилин, Л.Ю. Проектирование ИСФС с заданной характеристикой перестройки / Л.Ю. Шилин, И.Л. Свито, Д.П. Кукин // Сборник материалов IV Международной НТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – Новополоцк, 2006. – С. 241–244.

13–А. Кукин, Д.П. Разработка ИУФС с улучшенными динамическими характеристиками / Д.П. Кукин, А.А. Дерюшев // Сборник материалов IV Международной НТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – Новополоцк, 2006. – С. 244–245.

14–А. Кукин, Д.П. Основы синтеза цифровых СФС / Д.П. Кукин // Сборник материалов IV Международной НТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – Новополоцк, 2006. – С. 246–248.

15–А. Шилин, Л.Ю. Математическое моделирование ЦСФС / Л.Ю. Шилин, Д.П. Кукин, Д.С. Олиферович // Сборник материалов IV Международной НТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – Новополоцк, 2006. – С. 248–250.

16–А. Беляков, В.Б. Проектирование ЦСФАЧ / В.Б. Беляков, Д.П. Кукин, А.А. Дерюшев // Сборник материалов IV Международной НТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». – Новополоцк, 2006. – С. 250–252.

17–А. Кукин, Д.П. Элементы синтеза цифровых систем фазовой синхронизации / Д.П. Кукин // Международная научно-практическая конференция «Техника и технологии: инновации и качество». – Барановичи, 2007. – С. 67.

18–А. Дерюшев, А.А. Улучшение характеристик фазовых детекторов / А.А. Дерюшев, Д.П. Кукин // Материалы 4-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ – 2008»». – Севастополь, 2008. – С. 59.

19–А. Кукин, Д.П. Синтез цифровой системы фазовой синхронизации на основе микроконтроллера // Д.П. Кукин, Л.Ю. Шилин // Сборник материалов Международной НТК «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров». – Минск, 2008. – С. 83–84.

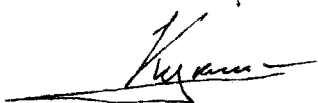
20–А. Кукин, Д.П. Применение нелинейных корректирующих устройств в цифровых системах фазовой синхронизации / Д.П. Кукин // Сборник

материалов Международной НПК «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров». – Минск, 2008. – С. 81–83.

21–А. Бусько, В.Л. Имитационное моделирование цифровых устройств фазовой автоподстройки частоты / В.Л. Бусько, Л.Ю. Шилин, Д.П. Кукин // Сборник материалов Международной НПК «Моделирование – 2008». – Киев, 2008. – Т. 2 – С. 527–531.

Депонированная научная работа

22–А. Разработать методы анализа и синтеза импульсных электрических цепей с фазовым управлением и электромеханических систем: отчет о НИР / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; рук. Л.Ю. Шилин. – Минск, 2006. – 46 с.: 27 рис. – № ГР 2004855. – Рус. Деп. в ГУ «БелИСА» 29.11.2006, № Д200664.



РЭЗЮМЭ

Кукін Дзмітрый Пятровіч

Аналіз і параметрычны сінтэз лічбавых прыладаў фазавай сінхранізацыі

Ключавыя словы: лічбовыя прылады фазавай сінхранізацыі, імітацыйнае мадэляванне, аналіз, параметрычны сінтэз, нелінейная карэктыруючая прылада з дынамічным каэфіцыентам узмацнення.

Мэтай работы з'яўляецца распрацоўка машына-арыентаваных метадаў аналізу і параметрычнага сінтэзу лічбавых прыладаў фазавай сінхранізацыі.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца лічбовыя прылады фазавай сінхранізацыі. *Прадметам даследавання* з'яўляюцца метады паляпшэння ставячых і дынамічных характэрыстык даследуемых сістэм.

Навуковая *навізна* атрыманых аўтарам вынікаў складаецца ў наступным: распрацавана паслядоунасць складання матэматычнай мадэлі лінейнага або лінеарызаванага блока лічбавай прылады фазавай сінхранізацыі (ЛПФС) адвольнай складанасці; у адрозненне ад вядомых аналагаў атрыманае апісанне з'яўляецца высокадакладнай машына-арыентаванай мадэллю; сінтэзавана ўніверсальная імітацыйная мадэль ЛПФС, якая дазваляе змяняць параметры блокаў сістэмы; у супроцьлегласць існуючым атрыманая мадэль з'яўляецца высокадакладнай лічбавай мадэллю, якая дазваляе даследваць ЛПФС у розных рэжымах дзеяння і якая ўлічвае дыскрэтныя і нелінейныя асаблівасці прылады; распрацаваны эфектыўныя метады аналізу ўстойлівасці ЛПФС, вынікам ужывання якіх з'яўляецца пабудова адпаведных вобласцёў устойлівасці; прапанаваны ўніверсальны метад параметрычнага сінтэзу цыфравых сістэм фазавай сінхранізацыі, які ўлічвае вялікую колькасць патрабаванняў; распрацаваны аўтарскі метад (пададзена заяўка на вынаходства) паляпшэння дынамічных характэрыстык ЛПФС пры дапамозе нелінейнай карэктыруючай прылады з дынамічным каэфіцыентам узмацнення.

Асноўныя *вынікі* дысертацыйнай працы ўкаранёныя і выкарыстаюцца ў СП «Бевалекс», у ВА «Беларуськалій», а таксама ў навучальным працэсе ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі».

РЕЗЮМЕ

Кукин Дмитрий Петрович

Анализ и параметрический синтез цифровых устройств фазовой синхронизации

Ключевые слова: цифровые устройства фазовой синхронизации, имитационное моделирование, анализ, параметрический синтез, нелинейное корректирующее устройство с динамическим коэффициентом усиления.

Целью работы является разработка машинно-ориентированных способов анализа и параметрического синтеза цифровых устройств фазовой синхронизации.

Объектом исследования являются цифровые устройства фазовой синхронизации. *Предметом исследования* являются способы улучшения статических и динамических характеристик исследуемых систем.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем: разработан алгоритм составления математической модели линейного или линеаризованного блока цифрового устройства фазовой синхронизации (ЦУФС) произвольной сложности; в отличие от известных аналогов полученное описание является высокоточной машинно-ориентированной моделью; синтезирована универсальная имитационная модель ЦУФС, позволяющая изменять параметры составных блоков системы; в противоположность существующим полученная модель является высокоточной цифровой моделью, позволяющей исследовать ЦУФС в различных режимах работы и учитывающей дискретные и нелинейные свойства устройства; разработаны эффективные способы анализа устойчивости ЦУФС, результатом применения которых является построение соответствующих областей устойчивости; предложен универсальный способ параметрического синтеза цифровых устройств фазовой синхронизации, учитывающий большое количество требований; разработан авторский способ (подана заявка на изобретение) улучшения динамических характеристик ЦУФС при помощи нелинейного корректирующего устройства с динамическим коэффициентом усиления.

Основные результаты диссертационной работы внедрены и используются в СП «Бевалекс», в ПО «Беларуськалий», а также в учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

SUMMARY

Kukin Dmitry Petrovich

The analysis and parametrical synthesis of digital phase-locked loops

Keywords: digital phase-locked loops, simulation modelling, the analysis, parametrical synthesis, the nonlinear correcting device with a magnification coefficient of impact.

The activity *purpose* is development of the machine-oriented ways of analysis and parametrical synthesis of digital phase-locked loops.

The *subject* of inquiry are digital phase-locked loops. *An object* of research are ways of enriching static and dynamic characteristics of researched systems.

The scientific *novelty* of the outcomes received by the author consists in the following: the algorithm of compilation of mathematical model linear or linearized unit of a digital phase-locked loop (DPLL) of any complication is developed; unlike the known clones, the received exposition is the high-precision machine-oriented model; the universal simulation model DPLL is synthesized, allowing to variety arguments of constituent units of system; contrary to existing, the received model is the high-precision numeral model, allowing to research DPLL in various modes of behavior and allowing for discrete and nonlinear properties of the device; effective ways of stability analysis DPLL which one outcome of application is constructing of appropriate stability regions are developed; the universal method of a parametric synthesis of digital phase-locked loops an allowing for a great many of requests is tendered; the authoring way (the claim for a discovery is given) enriching of dynamic responses DPLL by means of the nonlinear correcting device with a magnification coefficient of impact is developed.

The basic *results* of dissertational work are introduced and used in joint venture «Bevalex», in «Belarusikaliy», and also in educational process of the «Belarus State University of Informatics and Radioelectronics».

Научное издание

КУКИН
Дмитрий Петрович

**АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления»

Подписано в печать 11.01.2010.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.	Заказ 77.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.

220013, Минск, П. Бровка, 6.