

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 681.511.4

Хекмаг Ахмед Ахмед АЛЪКАТАУНА

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ
АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Минск, 2007

Работа выполнена на кафедре систем управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР).

Научный руководитель –

Кузнецов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления, проректор по научной работе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Куренев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», профессор кафедры систем автоматического управления)

Дерюшев Андрей Александрович, кандидат технических наук

(учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», доцент кафедры теоретических основ электротехники)

Оппонирующая организация:


учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 14 февраля 2008 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013 Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автор черат разослан «__» января 2008 года.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
канд. техн. наук, доцент

 М. П. Ревот

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена повышению быстродействия и статистическому анализу фазовых систем управления (ФСУ), нашедших широкое применение в различных областях автоматики, вычислительной техники, радиотехники и связи. Примерами таких систем являются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), системы регулирования скорости, синтезаторы частот, стабилизаторы напряжения, фильтры, системы беспойсковой и бесподстроечной радиосвязи, устройства постановки и подавления помех, системы GPS, мобильная связь и др. Такие системы, обладающие высокими статическими характеристиками, должны быть быстродействующими. Часто повышение быстродействия таких систем является одним из определяющих факторов при их проектировании. ФСУ являются сложными нелинейными системами автоматического управления и могут работать при воздействии на них случайных возмущений и внутренних шумов. Учет инерционности ФСУ при вероятностном анализе смены режима их работы позволяет более полно учесть реальные свойства. Поэтому рассмотренные в диссертационной работе вопросы являются весьма актуальными.

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа выполнялась в рамках государственной комплексной программы научных исследований: задание «Механика 2.31» №ГР 20064368, БГУИР «Исследование механики технических и биомеханических систем, разработка эффективных методов повышения их надежности, создание новых компонентов машин и оборудования для машиностроения», тема «Разработка методов анализа и синтеза, алгоритмов, программного обеспечения и создание высокоэффективных систем автоматизации на основе современных информационных технологий и программно-аппаратных комплексов», 2006 г.; задание №37 ГПОФИ «Механика» №ГР 20022307, БГУИР по теме «Компьютерный анализ и синтез дискретных систем управления для фильтрации сигналов и автоматизации виброиспытаний», 2001–2005 г.; НИР по Фонду фундаментальных исследований №ГР 20044225 по теме «Анализ и синтез систем и устройств измерения координат, параметров движения и линейных размеров лоцируемых объектов», 2004–2006 г.; НИР по Фонду фундаментальных исследований №ГР 20066857 на тему «Разработка современных методов теории сложных динамических систем для управления беспилотными летательными аппаратами», 2006–2007 г.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является вероятностный анализ ФСУ и разработка методов повышения быстродействия таких систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- обоснование математических моделей для анализа и синтеза ФСУ с учетом их статистических характеристик;
- анализ путей повышения быстродействия ФСУ и разработка методики их расчета с делителями с дробным переменным коэффициентом деления (ДДПКД);
- моделирование и синтез быстродействующих фазовых систем управления с учетом их статистических характеристик;
- вероятностный анализ поисковой системы ФСУ и анализ срыва синхронизма в ней с учетом инерционности;
- статистический анализ фазовых систем управления.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1 Способы, базирующиеся на использовании делителя с дробным переменным коэффициентом деления (ДДПКД), позволяющие повысить на порядок полосу пропускания систем синхронизации и, как следствие, повысить их быстродействие.

2 Способы и алгоритмы технической реализации цифровых синтезаторов отсчетов (ЦСО), использующихся в качестве делителей с дробным переменным коэффициентом деления и позволяющие повысить дробность деления частоты до величин 10^{-5} – 10^{-7} .

3 Методика статистического анализа поисковой системы и срыва синхронизма фазовых систем управления ФСУ, отличающаяся учетом динамических свойств ФСУ.

4 Результаты статистического анализа фазовых систем управления.

Личный вклад соискателя

Основные результаты диссертационной работы получены и реализованы лично автором. В публикациях с соавторами вклад определяется рамками излагаемых в диссертации результатов. Научный руководитель принимал участие в постановке задачи и определении основных путей решения.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались в десяти работах на следующих конференциях и семинарах:

1. 3-я Белорусско-Российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации», Минск – Нарочь, 23–27 мая 2005 г.;
2. 5-я Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях», Гомель, 12–14 марта 2007 г.;
3. 9-я Международная научно-практическая конференция «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров», Минск, 10–11 апреля 2007 г.;
4. 7-я Международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Исследования и разработки в области Машиностроения, энергетики и управления», Гомель, 3–4 мая 2007 г.;
5. Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники. Автоматизация проектирования», Красноярск, 4–5 мая 2007 г.;
6. 43-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные технологии и управление», Минск, 9–14 апреля 2007 г.;
7. 7-я Международная научно-практическая конференция «Моделирование: теория, методы и средства», Новочеркасск, 6 апреля 2007 г.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты научных исследований опубликованы в семи статьях в рецензируемых научных журналах, а также в девяти других печатных работах (шести статьях в сборниках докладов конференций, трех тезисах докладов) общим объемом 4,5 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. В первой главе проведен обзор ФСУ, их обобщенных структурных схем и математических моделей, рассмотрены пути сведения ДФСУ к непрерывным системам, рассмотрен метод параметрического синтеза ФСУ, освещены вопросы моделирования ДСФУ, проведено имитационное моделирование. Во второй главе рассмотрены методы повышения быстродействия синтезаторов частот, исследована возможность реализации дробного эквивалентного коэффициента деления с помощью цифрового синтезатора

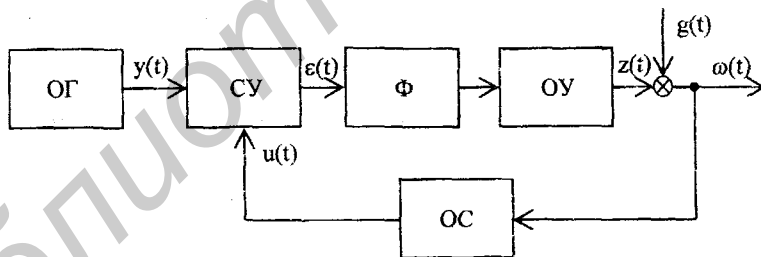
отсчетов, выполнен расчет параметров ЦСО и основных статических параметров синтезатора для различных способов перестройки ЦСО, приведены таблицы перестройки выходной частоты синтезатора, проведена экспериментальная проверка результатов моделирования систем синхронизации с ДДПКД. В третьей главе на основе теории марковских случайных процессов рассматриваются задачи оценки вероятности срыва слежения и перехода системы фазовой автоподстройки частоты из режима биений в режим удержания при учете инерционности системы. Общий объем диссертации – 111 страниц, текст иллюстрируется 38 рисунками и 10 таблицами. При выполнении работы использовано 127 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, охарактеризовано современное состояние исследований ФСУ, определены направления диссертационного исследования.

В первой главе проводится обзор построения ФСУ различного функционального назначения, на основе чего дана обобщенная функциональная схема ФСУ, приведенная на рисунке 1.

Рассмотрены математические модели ФСУ на основе метода переменных состояния для наиболее часто используемых на практике детекторов триггерного типа и типа «выборка-запоминание».



ОУ – объект управления; Ф – блок, включающий фильтрующие, корректирующие и усилительно-преобразовательные устройства;
 ОС – устройства цепи обратной связи; СУ – сравнивающее устройство;
 $g(t)$ – возмущение, действующее на ФСУ и приведенное к выходу системы

Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема ФСУ

Для упрощения анализа дискретной фазовой системы управления (ДФСУ) с различными видами время-импульсной модуляции (ВИМ) управляющего сигнала можно использовать приближенный метод, суть которого заключается в замене ДФСУ с ВИМ эквивалентной непрерывной. Для этого про-

изводится постепенный переход от исходной системы к системе с широтно-импульсной (ШИМ) модуляцией. Далее для исследования динамики ДФСУ используем принцип эквивалентных площадей. На основании этого принципа ДФСУ с ШИМ можно свести к системе с амплитудной модуляцией путем замены импульсов, модулированных по длительности, прямоугольными импульсами постоянной длительности τ_0 , модулированными по амплитуде, с сохранением площади каждого импульса:

$$S_{\text{ШИМ}} = S_{\text{АИМ}}. \quad (1)$$

Такая замена предполагает, что период дискретности T значительно меньше наибольшей постоянной времени линейного участка статической характеристики широтно-импульсного элемента. Если в ДФСУ с ШИМ амплитуда импульсов была равна B , тогда, учитывая равенство площадей импульсов, получим:

$$S_{\text{ШИМ}} = B\tau = B \frac{\Delta \varepsilon T}{2\pi}, \quad (2)$$

$$S_{\text{АИМ}} = A\tau_0 = \Delta \varepsilon K_{\text{СУ}}\tau_0. \quad (3)$$

Для выполнения условия (1) с учетом (2) и (3) необходимо выбрать величину $K_{\text{СУ}}$, равной

$$K_{\text{СУ}} = \frac{BT}{2\pi\tau_0} = \frac{B}{2\pi\chi}, \quad (4)$$

где коэффициент $\chi = \frac{\tau_0}{T}$.

В свою очередь, устройство ФСУ с АИМ может быть сведено к эквивалентному непрерывному устройству при выполнении условий теоремы Котельникова–Шеннона об условии неискаженной передачи непрерывного сигнала конечным числом его дискретных значений:

$$\begin{cases} f_{\text{ЗГ}} \geq 2f_{\text{НП}}; \\ f_{\text{f}} \leq f_{\text{ЗГ}} - f_{\text{НП}}, \end{cases} \quad (5)$$

где $f_{\text{ЗГ}}$ – частота повторения импульсов задающего генератора;

$f_{\text{НП}}$ – граничная частота полосы пропускания;

f_{f} – наибольшая частота внешнего воздействия, приведенная ко входу импульсного элемента.

В ряде случаев вместо (5) используются более жесткие условия вида

$$\begin{cases} f_{3Г} \geq 3f_{НП} \\ f_f \leq f_{3Г} - 2f_{НП} \end{cases} \quad (6)$$

В результате математическая модель эквивалентного непрерывного устройства ФСУ представляется системой дифференциальных уравнений в нормальной форме.

Такой подход позволяет значительно сократить время при предварительных расчетах ФСУ, однако не является строгим. Точность метода возрастает при уменьшении индекса модуляции.

Рассмотренные выше модели не позволяют провести сравнительное моделирование ФСУ различной структуры за небольшое время, т.к. для каждого варианта структурной схемы приходится разрабатывать свою модель и соответствующее программное обеспечение. Кроме того, существующие модели не учитывают специфику построения быстродействующих ФСУ (например, использующих делители с дробным переменным коэффициентом деления); поэтому было принято решение о разработке авторской имитационной модели.

При построении имитационной модели рассматривается не вся система в целом, а каждый составляющий ее элемент по отдельности. Любой элемент, так или иначе, может быть представлен в виде алгоритма или простейшего аналитического выражения с определенным набором входных и выходных параметров.

Математическое описание имитационной модели может быть представлено системой уравнений:

$$\begin{cases} \omega_{\text{вых}}(t) = f_{ГГ}(g(t), z(t)); \\ z(t) = f_{НЛЧ}(\varepsilon(t), t); \\ \varepsilon(t) = f_{ИФД}(y(t), u(t)); \\ u(t) = f_{ОС}(\omega_{\text{вых}}(t)), \end{cases} \quad (7)$$

где $f_{ГГ}(g(t), z(t))$ – функция, описывающая работу управляемого генератора (в простейшем случае $f_{ГГ} = g(t) + K_{\text{ген}} z(t)$);

$f_{НЛЧ}(\varepsilon(t), t)$ – математическое описание модели непрерывной линейной части системы, рамках которого проводится решение системы дифференциальных уравнений на текущем интервале интегрирования;

$f_{ИФД}(y(t), u(t))$ – математическое описание функционирования фазового детектора (работа любого типа сравнивающего устройства в принципе может быть представлена достаточно простым алгоритмом - на основе информации о

сигналах на входе $u(t)$ и $u(t)$ вырабатывается сигнал на выходе в текущий момент времени t);

$f_{OC}(\omega_{вых}(t))$ – выражение, служащее для определения момента прихода импульса из цепи обратной связи на вход ИФД.

Программное обеспечение для практической реализации имитационной модели было разработано в среде Visual Studio 6.0. Для упрощения экспериментов построена база данных, хранящая модели и принципиальные электрические схемы типовых узлов систем с фазовым управлением: сравнивающих устройств, операционных усилителей, фильтров, генераторов, делителей и т.п. Есть возможность подключения библиотек для описания новых устройств.

Несмотря на то, что теоретически весь процесс проектирования ДФСУ можно проводить по точным нелинейным моделям, на практике применяется двухстадийный подход. На начальной стадии проектирования применяются линейные и линеаризованные модели, которые позволяют провести предварительную оценку параметров системы при значительно меньших затратах машинного времени, чем нелинейные модели. На второй стадии производится уточнение полученных результатов и корректировка параметров системы по точным нелинейным моделям. Такой подход позволяет уменьшить сроки проектирования и стоимость разработанной системы.

Во второй главе рассмотрены методы повышения быстродействия фазовых систем управления.

Существенным недостатком ФСУ, построенных по одноконтурной схеме (см. рисунок 1), является взаимовлияние быстродействия и других параметров ФСУ – диапазона и шага выходной частоты, уровня побочных дискретных составляющих и т.д. Наиболее жестким ограничением является взаимосвязь между шагом сетки частот $\Delta f_{вых}$ и частотой сравнения f_{cp} :

$$\Delta f_{вых} = f_{cp} \cdot K_{ДФКД} \cdot \Delta K_{ДПКД}, \quad (8)$$

где $K_{ДФКД}$ – коэффициент деления ДФКД,

$\Delta K_{ДПКД}$ – минимальный шаг ДПКД, который в подавляющем большинстве случаев равен единице.

Из формулы (8) видно, что для заданного значения $\Delta f_{вых}$ частота сравнения определяется выражением

$$f_{cp} = \frac{\Delta f_{вых}}{K_{ДФКД} \cdot \Delta K_{ДПКД}}. \quad (9)$$

Для устранения противоречий между шагом перестройки и частотой сравнения используется большое количество методов, например многоконтурные и комбинированные схемы. Однако в отдельном кольце многоконтурной схемы остаются те же самые противоречия (возможно в ослабленном виде).

В соответствии с формулой (9) одним из методов увеличения быстродействия ФСУ является уменьшение $K_{ДФКД}$. Практически это может быть выполнено за счет повышения рабочей частоты ДПКД. Второй путь увеличения быстродействия – уменьшение шага коэффициента деления ДПКД, т.е. использование дробных делителей.

В обоих случаях повысится частота сравнения $f_{ср}$. Однако высокая частота сравнения сама по себе не обеспечивает высокого быстродействия; для этого необходимо обеспечить минимальную инерционность контура ФСУ. Для обеспечения малой инерционности и хорошего быстродействия рекомендуется использовать системы, использующие детектор типа «выборка-запоминание».

Основной путь повышения быстродействия ДПКД – выбор такой структуры, которая позволила бы работать ДПКД с быстродействием, определяемым одним логическим элементом. При этом число возможных структур построения ДПКД резко сокращается, и выбор той или иной структуры в значительной мере зависит от существующих интегральных схем, согласования их уровней, возможностей управления и т. д.

Обычные ДПКД обеспечивают целочисленное изменение коэффициента деления, при этом минимально возможный шаг равен единице. Следовательно, при задании требуемого шага сетки частот однозначно заданными оказываются также конкретные значения частоты, которые кратны шагу сетки. Это означает, что фактически установка сетки частоты одноконтурного ФСУ не может быть выполнена с точностью, превышающей половину шага.

Увеличивать точность за счет уменьшения шага сетки выходных частот можно лишь до некоторого минимального значения, определяемого минимально допустимым значением частоты сравнения, которое нельзя уменьшить из-за ухудшения динамических характеристик.

На рисунке 2 показан примерный вид сетки частот одноконтурной фазовой системы управления. За счет изменения частоты сравнения $f_{ср}$ сетка выходных частот может быть сжата или растянута; однако ее нельзя сместить в пределах одного шага при его неизменной величине, как показано штриховыми линиями.

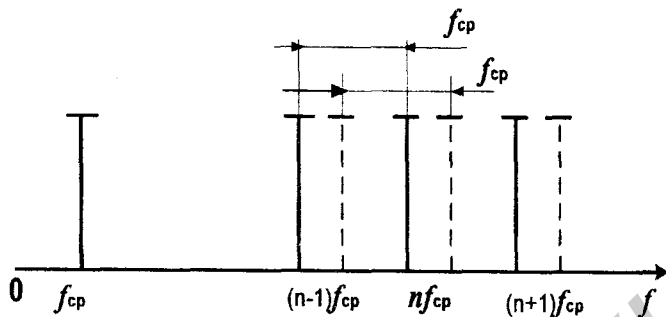


Рисунок 2 – Сетка выходных частот одноконтурного ФСУ

При реализации дробного изменения коэффициента деления появляется возможность получить сетку частот, значения которой необязательно кратны шагу сетки. При этом частота сравнения контура не уменьшается. Другими словами, задача ставится следующим образом: обеспечить в заданном диапазоне перестройки установку любого значения выходной частоты с заданной точностью при определенном значении частоты сравнения.

Для реализации второго способа повышения быстродействия (реализации эквивалентного дробного коэффициента деления) было предложено использовать в качестве делителя частоты цифровой синтезатор отсчетов (ЦСО). Было показано, что при использовании различных методов перестройки ЦСО можно обеспечить дробность шага перестройки эквивалентного коэффициента деления, достигающую $10^{-5} \dots 10^{-7}$.

В качестве примера использования ЦСО в ФСУ на рисунке 3 приведена структурная схема синтезатора частот.

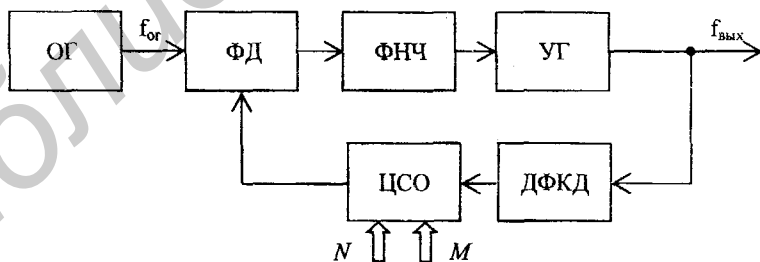


Рисунок 3 – Структурная схема синтезатора частот с ЦСО

Будем полагать, что в качестве исходных статических параметров синтезатора заданы максимальная выходная частота $f_{\text{вых max}}$, минимальная выходная

частота $f_{\text{вых min}}$, шаг сетки частот Δf , количество частот n , относительная точность установки δ . Предполагается также, что перестройку частоты синтезатора необходимо выполнить в узком диапазоне частот D (около 1 %). Синтезатор должен обеспечить как установку значения $f_{\text{вых min}}$ или $f_{\text{вых max}}$, так и формирование сетки частот с шагом Δf , причем ошибка установки любого из этих значений частоты не должна превышать величину $\pm \delta \cdot f_{\text{вых min}}$. Таким образом, потенциально синтезатор частот должен обеспечивать возможность формирования более мелкой сетки с шагом, не превышающим $2 \cdot \delta \cdot f_{\text{вых min}}$, который может быть значительно меньше заданного шага Δf , т.е. значения требуемого ряда частот должны выбираться из более обширного ряда.

При проектировании необходимо выбрать способ перестройки ЦСО и оценить параметры синтезатора – максимальную емкость N_{max} накопительного сумматора, разрядность цифроаналогового преобразователя ЦАП, частоту сравнения, диапазон изменения эквивалентного коэффициента деления ЦСО и коэффициент деления предварительного делителя $K_{\text{дфкл}}$.

В работе проведен анализ трех возможных вариантов управления выходной частотой ФСУ, основанных на включении в цепь обратной связи дополнительного цифрового синтезатора отсчетов (ЦСО). Управление ЦСО производится за счет изменения кода M при неизменном N , за счет изменения кода N при неизменном M , за счет одновременного использования возможностей управления по M и N . Третий вариант является наиболее универсальным, однако, поскольку при перестройке частоты синтезатора кодами M и N последовательность несократимых дробей вида M/N составляет ряд Фарея, то при выборе диапазона изменения дробей следует учитывать свойства этого ряда. В частности, необходимо иметь в виду, что в окрестности целых чисел интервалы между соседними членами ряда Фарея становятся больше, чем на других участках ряда. В связи с этим следует выбирать диапазон изменения эквивалентного коэффициента деления ЦСО таким образом, чтобы он не включал окрестности целых чисел.

Для иллюстрации предложенных способов дан пример расчета синтезатора, приведены таблицы перестройки частоты.

Расчетные результаты были проверены с помощью низкочастотного макета синтезатора частот. Частота сравнения была выбрана равной 1,565 кГц, выходная частота была обусловлена быстродействием примененного ЦАП. Разрядность преобразователя составляла 11 двоичных разрядов, в связи с чем проверка установки коэффициентов была выполнена лишь для четных значений N . Проведенная экспериментальная проверка показала соответствие действительных параметров ФСУ расчетным.

В третьей главе рассмотрены задачи вероятностного анализа фазовых систем управления. Статистический характер процессов в ФСУ связан с рядом причин:

- воздействием внешней среды, изменяющей параметры системы;
- флуктуациями сигналов в отдельных блоках (например фазы и частоты управляемого генератора);
- воздействием случайных сигналов на вход системы (например в ФСУ слежения за фазой входного сигнала).

Для быстродействующих ФСУ наибольшее значение имеет анализ времени захвата и времени до срыва синхронизма. В реальных ФСУ срыв синхронизма, как и переход в режим удержания, не может произойти мгновенно. Для перехода системы из режима биений в режим синхронизации необходимо, чтобы разность фаз φ находилась в окрестности точки устойчивого равновесия φ_{0p} не менее времени τ_s . Инерционность перехода системы при срыве синхронизма может быть приближенно охарактеризована максимальным интервалом времени τ_c пребывания разности фаз за пределами границ области работоспособности системы $U_\varphi = [\varphi_- = \varphi_{0p} - 2\pi, \varphi_+ = \varphi_{0p} + 2\pi]$, при котором еще не происходит перехода системы в неработоспособное состояние.

На основе теории марковских случайных процессов рассматриваются задачи оценки вероятности перехода системы из режима биений в режим удержания и вероятности срыва синхронизма при учете динамических характеристик ФСУ.

Вероятность захвата сигнала вычисляется по формуле

$$P_3(t_r) = 1 - \prod_{i=1}^r \left\{ 1 - P_1(t_i) P_2(t_i + \tau_3 | \varphi(t_i) \in U_\varphi) \right\}, \quad r = 0 \dots k-1; \quad k = (t_k - t_0) / \tau_3. \quad (4)$$

где $P_1(t_i)$ – вероятность нахождения φ в области захвата U_φ в каждый текущий момент времени t_i ;

$P_2(t_i + \tau_3 | \varphi(t_i) \in U_\varphi)$ – вероятность невыхода φ из области U_φ в течение времени τ_3 , необходимого для перехода системы в режим удержания.

Входящие в (4) вероятности P_1 и P_2 вычисляются по формулам

$$P_1(t_i) = \int_{U_\varphi} f(\varphi, t_i) d\varphi, \quad (5)$$

$$P_2(t_i + \tau_3 | \varphi(t_i) \in U_\varphi) = \exp \left(- \int_{t_i}^{t_i + \tau_3} q(t) dt \right), \quad (6)$$

где $q(t)$ – интенсивность поглощения реализаций процесса $\varphi(t)$, численно равная значению плотности потока вероятности непоглощенных реализаций, вычисленной на границе поглощающей области.

На рисунках 4–6 приведены соответственно примеры расчета вероятностей P_1 , P_2 и P_3 .

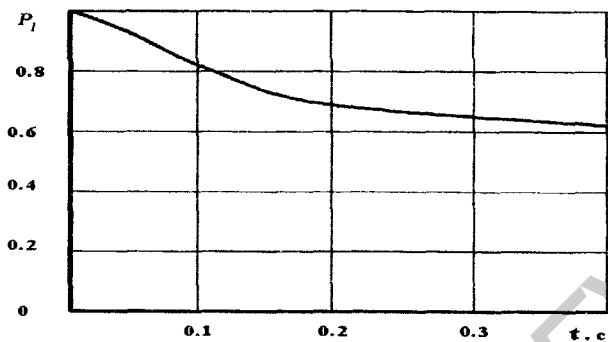


Рисунок 4 – График зависимости $P_1(t)$

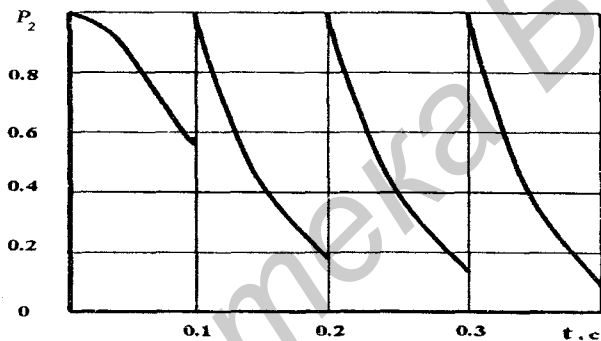


Рисунок 5 – График зависимости $P_2(t)$

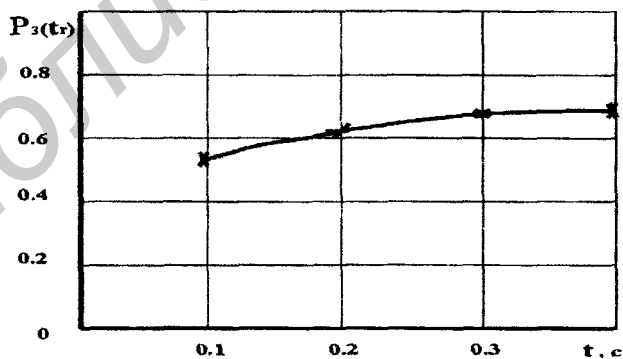


Рисунок 6 – График зависимости $P_3(t)$

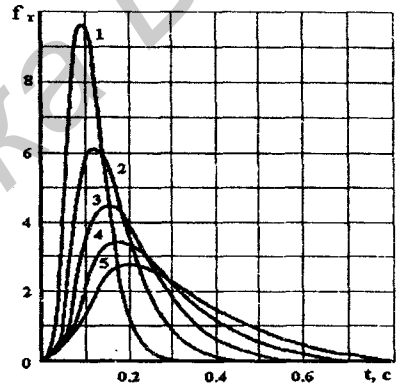
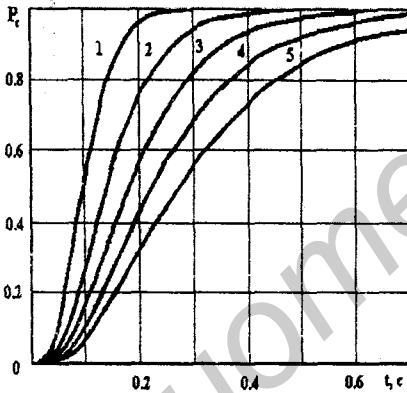
Вероятность срыва синхронизма вычисляется по формуле

$$P_C(t_r) = 1 - \prod_{i=1}^r \left\{ 1 - \left(\sum_{j=1}^2 \{ P_1^{(j)}(t_i) P_2^{(j)}(t_i + \tau_c | \varphi(t_i) \notin U_\varphi) \} \right) \right\}. \quad (7)$$

где $P_1(t_i)$ – вероятность нахождения $\varphi(t)$ вне области работоспособности U_φ в момент времени t_i ;

$P_2^{(j)}(t_i + \tau_c | \varphi(t_i) \notin U_\varphi)$ – вероятность невозвращения $\varphi(t)$ в область U_φ за время τ_c .

На конкретных примерах показана работоспособность предлагаемого подхода и получены конкретные вероятностные характеристики перехода ФСУ из одного состояния в другое; пример расчета вероятностей срыва синхронизма для различных значений τ_c приведен на рисунке 7, а на рисунке 7, б приведены графики плотности распределения вероятности.



1 – $\tau_c = 0,01$ с, 2 – $\tau_c = 0,02$ с, 3 – $\tau_c = 0,03$ с,
4 – $\tau_c = 0,04$ с, 5 – $\tau_c = 0,05$ с

Рисунок 7 – Вероятность срыва синхронизма и плотность вероятности распределения времени срыва синхронизма

Исследованы вопросы статистического анализа нелинейных импульсных систем. За основу взят метод Галеркина приближенного расчета апостериорной функции распределения вероятностей.

Рассматриваются вопросы вычисления статистических характеристик для системы, работающей на кратных частотах, а также приведены результаты численного расчета коэффициентов разложения в ряд функции плотности распре-

деления вероятностей (ПРВ). Данные результаты могут также характеризовать скорость сходимости ряда.

На рисунке 8 приведены зависимости плотности распределения вероятности с фиксированным числом составляющих (коэффициенты разложения) и различными значениями параметра T_0 (расчеты проводились с помощью системы MATLAB).

Расчет A_n выполнялся при $\beta = 0$ ($B = 0$), $A = e^{-m^2 \sigma^2 / 2}$, $\sigma^2 = T_0(2 - T_0) / \rho$, $\rho = 1$, $T_0 = 0$, $c_n = A_n$ и $T_0 = \text{var}$, диапазон фазового рассогласования $(-\pi/3, \pi/3)$.

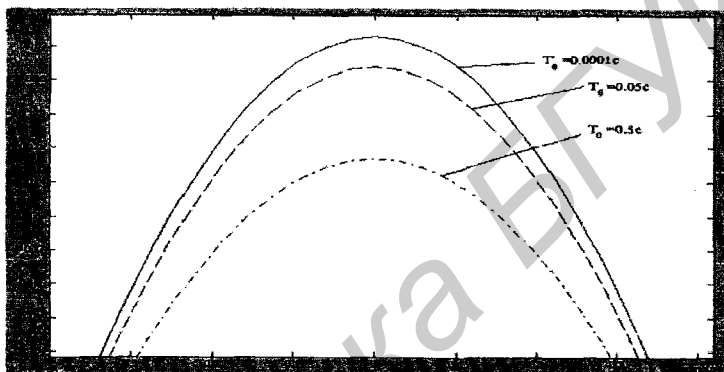


Рисунок 8 – ПРВ сигнала рассогласования для системы, работающей на кратных частотах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты

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

1. Проведен обзор фазовых систем управления различного функционального назначения, дана их обобщенная структурная схема. Рассмотрены упрощенные математические модели дискретных фазовых систем управления (ДФСУ) с различными видами время-импульсной модуляции управляющего сигнала, полученные путем сведения к непрерывным системам. Описаны точные нелинейные модели ДФСУ на основе метода переменных состояния, позволяющие учесть дискретные и нелинейные свойства ФСУ [9–А, 11–А, 12–А].

2. Предложена имитационная модель ДФСУ. В отличие от известных предложенная модель позволяет производить точный расчет быстродействующих ДФСУ различного функционального назначения без значительных затрат времени при изменении структурной схемы анализируемой системы, а также учитывать особенности построения отдельных блоков (например делителей с

переменным коэффициентом деления) высокочастотных ДФСУ. На основе предложенной модели разработано программное обеспечение и проведено сравнительное моделирование, показавшее достоверность получаемых результатов [3–А, 13–А, 16–А].

Рассмотрен метод параметрического синтеза фазовых систем управления, учитывающий устойчивость, синхронизацию, быстродействие и другие показатели качества [8–А, 10–А, 15–А].

3. Проведен анализ способов повышения быстродействия синтезаторов частот на основе контура фазовой автоподстройки частоты. Показано, что для повышения быстродействия системы в целом необходимо увеличивать максимальную рабочую частоту делителя в цепи обратной связи и уменьшать задержку выходного сигнала делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД) относительно входного. Предложены структурные и принципиальные схемы ДПКД, позволяющие, в отличие от известных, уменьшить задержку выходного сигнала относительно входного до задержки, определяемой одним логическим элементом [5–А].

4. Предложен и экспериментально проверен способ перестройки частоты синтезатора с помощью цифрового синтезатора отсчетов (ЦСО). Показано, что применение ЦСО вместо ДПКД позволяет либо значительно (до двух порядков) уменьшить требования к частоте сравнения контура ФАПЧ, либо увеличить дискретность формирования сетки выходных частот. Выполнен расчет параметров ЦСО и основных статических параметров синтезатора для различных способов перестройки ЦСО. Приведены таблицы перестройки выходной частоты синтезатора [1–А, 7–А].

5. Разработаны методики расчета вероятности захвата и срыва синхронизма ФСУ, позволяющие, в отличие от известных, учитывать динамические свойства системы. Разработанные методики позволяют упростить решение практических задач вероятностного анализа поисковой системы [4–А, 6–А]. Предложена машинно-ориентированная методика статистического анализа ФСУ с применением метода Галеркина, позволяющая сократить время вычислений [2–А, 14–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенные в работе методики построения быстродействующих синтезаторов частоты с мелким шагом могут быть использованы:

- в мобильной связи и системных GPS;
- для расчета высокочастотных систем стабилизации скорости (например приводов затворов скоростных фото- и кинокамер);
- в системах постановки помех и отстройки от них путем синтеза новых частот, близких к частоте подавления, и фильтрации помех при отстройках за счет использования фильтрующих свойств ФСУ в целом;
- в помехоустойчивой радиолокации за счет быстрой смены несущих частот.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1—А. Кузнецов, А.П. Методика расчета быстродействующих систем синхронизации с мелким шагом выходного сигнала / А.П. Кузнецов, А.В. Марков, Х.А. Алькатауна // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – №5(41). – С. 101–108.

2—А. Кузнецов, А.П. Стохастический анализ дискретных систем фазового управления / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна, Н.А. Капанов // Доклады БГУИР. – 2007. – №1(17). – С. 23–29.

3—А. Кузнецов, А.П. Модели дискретных систем с фазовым управлением / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2007. – №3. – С. 20–26.

4—А. Лобатый, А.А. Вероятностный анализ срыва синхронизма системы фазовой автоподстройки частоты / А.А. Лобатый, В.Л. Бусько, Х.А. Алькатауна // Доклады БГУИР. – 2007. – № 3(19). – С. 24–30.

5—А. Кузнецов, А.П. Быстродействующие системы синхронизации с мелким шагом выходного сигнала / А.П. Кузнецов, А.В. Марков, Х.А. Алькатауна // Вестник ГТТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – №3. – С. 91–98.

6—А. Лобатый, А.А. Вероятностный анализ поисковой системы фазовой автоподстройки частоты / А.А. Лобатый, В.Л. Бусько, Х.А. Алькатауна // Доклады БГУИР. – 2007. – №4. – С. 5–12.

7—А. Кузнецов, А.П. Реализация синтезатора частот с использованием дробного делителя / А.П. Кузнецов, А.В. Марков, Х.А. Алькатауна // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2007. – №5. – С. 48–60.

Материалы конференций

8—А. Кузнецов, А.П. Автоматизированное проектирование систем с фазовым управлением / А.П. Кузнецов, Д.А. Ганьшин, Л.В. Русак, А.А. Седушкин, Х.А. Алькатауна // Технические средства защиты информации: материалы докладов 3-й Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск–Нарочь, 23–27 мая 2005 г. / Белорус. гос. ун-т инф. и радиоэлектроники. – Минск, 2005. – С. 38.

9—А. Кузнецов, А.П. Математические модели импульсных систем с фазовым управлением / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна, Н.А. Капанов // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы 10-й респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 12–14 марта 2007 г. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2007. – С. 32–33.

10—А. Кузнецов, А.П. Параметрический синтез импульсных систем фазового управления / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна, Н.А. Капанов // Новые ма-

тематические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: сб. материалов 10-й респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 12–14 марта 2007 г. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2007. – С. 33–34.

11–А. Кузнецов, А.П. Дискретные системы с фазовым управлением и их математические модели / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна, Н.А. Капанов // Моделирование. Теория, средства: сб. материалов 7-й междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 6 апреля 2007 г. / Южно-российский государственный технический университет. – Новочеркасск, 2007. – С. 25–27.

12–А. Кузнецов, А.П. Моделирование процессов дискретных систем с фазовым управлением с помощью пакета Matlab / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна // Моделирование. Теория, средства: сб. материалов 7-й междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 6 апреля 2007 г. / Южно-российский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2007. – С. 27–28.

13–А. Алькатауна, Х.А. Модели дискретных систем с фазовым управлением / Х.А. Алькатауна, Д.А. Ганьшин // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: сб. материалов 9-й междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–11 апреля 2007 г. / Минский гос. высш. радиотехн. колледж. – Минск, 2007. – С. 26–28.

14–А. Кузнецов, А.П. Анализ стохастических характеристик дискретных систем фазового управления методом Галеркина / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна, Н.А. Капанов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научных трудов всероссийской науч.-техн. конф., Красноярск, 4 мая 2007 г. / Политехнический институт ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2007. – С. 29–31.

15–А. Кузнецов, А.П. Проектирование дискретных систем с фазовым управлением / А.П. Кузнецов, Х.А. Алькатауна, Д.А. Ганьшин // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научных трудов всероссийской науч.-техн. конф., Красноярск, 4 мая 2007 г. / Политехнический институт ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2007. – С. 567–569.

16–А. Алькатауна, Х.А. Имитационные модели дискретных систем с фазовым управлением / Х.А. Алькатауна, Д.А. Ганьшин // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы 7-й междунар. межвузовской науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 3–4 мая 2007 г. / Гомельский государственный технический ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2007. – С. 173–175.

Кузнецов

РЭЗЬЮМЭ

Хікмат Ахмед Ахмед АЛЬКАТАУН ПАВЫШЭННЕ ХУТКАДЗЕЯННЯ І СТАТЫЧНЫ АНАЛІЗ ФАЗАВЫХ СІСТЭМ КІРАВАННЯ

Ключавыя словы: імітацыйнае мадэляванне, рэжым утрымання, імавернасць зрыву сінхранізму, хуткадзеянне, лічбавы сінтэзатар.

Праведзены агляд фазавых сістэм кіравання (ФСК), іх абагульненых структурных схем, матэматычных мадэляў, шляхі звядзення дыскрэтных фазавых сістэм кіравання (ДФСК) з рознымі станамі часу-імпульснай мадуляцыі да бесперапынных сістэм, разгледжаны метады параметрычнага сінтэзу ФСК і асвечаны пытанні мадэлявання ДФСК, атрыманы пераходныя працэсы сістэмы. Створана ўніверсальная імітацыйная мадэль ФСК, якая дазваляе праводзіць даследаванне сістэм рознай структуры у рэжымах частотнага і фазовага дэтэктавання, а таксама ўлічваць асаблівасці пастроення высокачастотных ФСК.

Разгледжаны метады павышэння хуткадзеяння сінтэзатараў частот на аснове контура ФАПЧ; пытанні павышэння максімальнай рабочай частаты ДПКД. Прыведзены структурныя і прынцыповыя схемы ДПКД, вынікі эксперыментальнага даследавання працы ўстройства. Прапанаваны спосаб павышэння хуткадзеяння сінтэзатара частаты з малым крокам выхадной сеткі – рэалізацыя дробнага эквівалентнага каэфіцыента дзеяння з дапамогай лічбавога сінтэзатара адлікаў (ЛСА).

Праведзены аналіз статычных параметраў сінтэзатара пры розных варыянтах кіравання ЛСА. Разгледжаны канкрэтныя прыклады разліку параметраў сістэмы сінхранізацыі частаты.

На аснове тэорыі маркаўскіх выпадковых працэсаў разгледжана задача ацэньвання імавернасці зрыву і пераходу сістэмы фазовай аўтападстройкі частаты з рэжыму біенняў у рэжым утрымання пры ўліку інерцыйнасці сістэмы. На аснове метада Галеркіна атрыманы статычныя характарыстыкі ФСК.

РЕЗЮМЕ

Хекмат Ахмед Ахмед АЛЪКАТАУНА

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЕ

Ключевые слова: имитационное моделирование, режим удержания, вероятность срыва синхронизма, быстродействие, цифровой синтезатор.

Проведен обзор фазовых систем управления различного функционального назначения, дана их обобщенная структурная схема. Рассмотрены упрощенные математические модели ДФСУ с различными видами время-импульсной модуляции управляющего сигнала, полученные путем сведения к непрерывным системам. Описаны точные нелинейные модели ДФСУ на основе метода переменных состояния, позволяющие учесть дискретные и нелинейные свойства ФСУ.

Предложена имитационная модель ДФСУ, позволяющая производить точный расчет быстродействующих ДФСУ различного функционального назначения без значительных затрат времени при изменении структурной схемы анализируемой системы, а также учитывать особенности построения высокочастотных ДФСУ. На основе предложенной модели разработано программное обеспечение и проведено сравнительное моделирование, показавшее достоверность получаемых результатов.

Проведен анализ способов повышения быстродействия синтезаторов частот на основе контура ФАПЧ. Показано, что для повышения быстродействия системы в целом необходимо увеличивать быстродействие делителя в цепи обратной связи. Предложены структурные и принципиальные схемы ДПКД, позволяющие реализовать быстродействие делителя, близкое к быстродействию одного логического элемента.

Предложен и экспериментально проверен способ перестройки частоты синтезатора с помощью ЦСО. Показано, что применение ЦСО вместо ДПКД позволяет либо значительно уменьшить требования к частоте сравнения, либо увеличить дискретность формирования сетки выходных частот. Выполнен расчет параметров ЦСО и основных статических параметров синтезатора для различных способов перестройки ЦСО. Приведены таблицы перестройки выходной частоты синтезатора.

На основе теории марковских случайных процессов рассмотрена задача оценки вероятности срыва и перехода системы фазовой автоподстройки частоты из режима биений в режим удержания при учете инерционности системы. На основе метода Галеркина получены статистические характеристики ФСУ.

SUMMARY

Hekmat Ahmed Ahmed ALQATAWNEH INCREASE OF PERFORMANCE AND STATISTICAL ANALYSIS PHASELOCKED CONTROL SYSTEMS

Keywords: imitation designing, control systems, synthesizer, frequency, phase, statistical, simulation, model.

The work contains three units. The first unit is devoted to common questions of the mathematical models of system of phase-locked control system, translates discrete phase-locked control systems to concurrent systems, parametrical synthesis of systems and the models of phase-locked control systems by imitating simulation by linear and nonlinear models.

The second unit is focused on the fast synchronization of speed and frequency systems with small step output signal, it means frequency synthesizer with small grid rate speed increasing – equivalent division factor with digital counter. Division analysis of synthesizer static parameters for different control types is described.

The third unit is based on the theory of Markov's processes considered objective evaluation of the likelihood of the transition automatic phase-locked control system of speed-frequency, from the beating to retention mode in view of the insertion of the system.

On the basis is of the theory of casual of Markov's processes the task of an estimation of probability of failure of synchronization of system of phase auto tuning of frequency is considered at the account the insertion of system.

The material of given units are devoted to the questions of the statistical analysis of nonlinear pulse systems. For a basis authors take a Galerkin's method of approaching account of distribution-function of probabilities. In the unit are considered questions of calculation of the statistical characteristics of phase-impulse system of auto tuning of frequency working on multiple frequencies and also the results of numerical account of factors of series expansion of distribution-function of probabilities. The results can also characterize speed of convergence of series.

Хекмат Ахмед Ахмед АЛЪКАТАУНА

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ
АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

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 03.01.2008.

Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 1,2.

Печать ризографическая.

Тираж 60 экз.

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,4.

Заказ 25.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6