

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 62-50:681.516

РУСАКОВИЧ
Алексей Николаевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ПРИВОДАМИ ПОВОРОТНО-ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (промышленность)

Минск 2016

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

Научный руководитель **Стрижнев Александр Гаврилович**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник СКБ-4 (Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»)

Официальные оппоненты: **Дудкин Александр Арсентьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией идентификации систем Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси;
Опейко Ольга Федоровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета

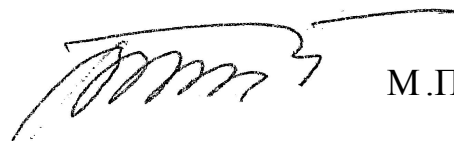
Оппонирующая организация Открытое акционерное общество «АГАТ-системы управления – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления»

Защита состоится «12» мая 2016 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.: 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан «___» апреля 2016 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук,
доцент



М.П. Ревотюк

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различной технике все более широкое применение находят высокоточные системы управления приводами, перемещающими различные виды нагрузок. Разработка любой системы управления – сложный и трудоемкий процесс, состоящий из множества этапов: выбор элементов, оценка предъявляемых требований, анализ различных механизмов, идентификация объекта управления, синтез регуляторов и т.д.

На начальном этапе необходимо выбрать элементы системы, наиболее подходящие под конкретные задачи. Вместе с тем при разработке эффективных систем управления необходимо определиться с самим понятием эффективности, т.е. проанализировать требования, предъявляемые к качеству работы систем управления, и предложить подходящий критерий для их оценки. Немаловажным этапом разработки является исследование применяемых в технике механизмов. Поворотно-подъемные механизмы имеют ряд присущих им особенностей, которые нужно учитывать при проектировании. Нелинейности типа люфт, износ трущихся деталей, температурные изменения параметров являются известными недостатками и широко описаны в литературе. Вместе с тем поворотно-подъемные механизмы содержат и другие нелинейности, которые необходимо определить и учитывать при проектировании. Одной из центральных задач при проектировании систем управления является идентификация объектов управления, которая в общем случае является хорошо изученной задачей. Однако в технике встречаются объекты управления, работающие в ограниченном диапазоне изменения выходных координат, идентификация которых с помощью классических методов является трудоемкой задачей, и для ее решения требуется разработка новых методик и алгоритмов. В конечном итоге разработанная модель должна быть адекватной реальному объекту, для чего необходимо максимально обеспечить учет выявленных особенностей при ее построении. Не менее важным является вопрос синтеза корректирующих устройств (регуляторов), которые обеспечивают требуемые динамические характеристики проектируемых систем. В настоящее время предлагается большое количество различных регуляторов, поэтому для выбора лучшего из них требуется проведение сравнительного анализа качества работы системы с различными корректирующими устройствами. Следует также обратить внимание на обеспечение устойчивости системы управления при работе в различных режимах.

Таким образом, высокое качество работы систем автоматического управления можно обеспечить лишь при комплексном подходе, предполагающем улучшение качественных показателей на каждом этапе разработки, с учетом нелинейностей механизмов, обеспечения точной идентификации объектов управления, в том числе при наличии различного рода ограничений, синтеза корректирующих устройств. Процесс разработки и синтеза современных систем автоматического управления всегда является источником новых научных задач, требующих быстрого и качественного решения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена на кафедре систем управления в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках ГБЦ № 14-3001 «Разработка эффективных алгоритмов и систем управления генерированием и потреблением электроэнергии в различных отраслях промышленности» № ГР 20143498, 2011–2015 гг., выполняемой по ГПНИ «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» (задание 1.1.20, утверждено постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 886 от 09.06.2010 г.).

Диссертационная работа соответствует следующим приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585: 1 «Энергообеспечение, энергосбережение, энергоэффективность, энергоэффективные технологии»: 1.6 «Энергосбережение, энергоэффективные технологии»; 7 «Машиностроение. Контроль и диагностика в машиностроении»: 7.1 «Механика, надежность, безопасность и экологичность машин, трение и износ в машинах, методы расчета, моделирования, проектирования, конструирования и испытаний машин, агрегатов и узлов»; 7.2 «Процессы функционирования машин и механизмов, механических, гидравлических, газовых и биомеханических систем, электронные системы управления узлами и агрегатами мобильных машин».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов, алгоритмов идентификации и синтеза систем управления приводами поворотного-подъемных механизмов, обеспечивающих повышение качества их работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современных высокоточных систем управления приводами и рассмотреть элементы, применяемые в данных системах; проанализировать требования, предъявляемые к качеству работы данных систем.
2. Исследовать поворотные-подъемные механизмы в качестве объекта управления. Разработать способ учета влияния нелинейностей рычажных механизмов различных приводов при синтезе системы управления.
3. Разработать способ обеспечения устойчивости и качества работы цифровых следящих систем с однооборотным энкодером в режиме кругового слежения.
4. Разработать методику идентификации нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат, которая позволяет получить регулировочные и частотные характеристики, необходимые для определения математической модели объекта управления.

5. Разработать метод синтеза цифрового регулятора, обладающего низкой чувствительностью к изменению параметров объекта управления в процессе эксплуатации и обеспечивающего требуемое качество работы системы управления при наличии высокочастотных составляющих во входных воздействиях.

Научная новизна

1. Разработан способ определения и учета влияния нелинейностей различных приводов с рычажными механизмами, основанный на аналитическом определении коэффициентов преобразования названных механизмов, который позволяет обеспечить учет влияния выявленных нелинейностей на работу приводов при синтезе систем управления.

2. Разработан способ компенсации ошибки перехода, основанный на использовании сигнала текущей ошибки системы, который позволяет обеспечить устойчивую работу следящих систем с однооборотным энкодером в режиме кругового слежения и отличается более простой структурой системы управления.

3. Разработана методика идентификации нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат, которая отличается применением специального входного сигнала с учетом текущего положения привода и позволяет осуществить полный цикл идентификации объектов управления данного класса.

4. Разработан аналитический метод синтеза цифрового регулятора в цепи обратной связи, отличающийся использованием выражений частотных характеристик типовых динамических звеньев и свойств гибкой обратной связи и позволяющий проектировать регуляторы с низкой чувствительностью к изменению параметров объекта управления и обеспечивающие требуемое качество работы системы при наличии высокочастотных входных воздействий.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ определения и учета влияния нелинейностей различных приводов с рычажными механизмами, позволяющий обеспечить учет влияния нелинейных коэффициентов преобразования при идентификации и синтезе систем управления.

2. Способ компенсации ошибки перехода, позволяющий обеспечить устойчивую работу следящих систем с однооборотным энкодером в режиме кругового слежения.

3. Методика идентификации нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат, которая позволяет получить регулировочные и частотные характеристики, необходимые для определения математических моделей объектов управления данного класса.

4. Метод синтеза цифрового регулятора в цепи обратной связи, который позволяет проектировать регуляторы, обладающие низкой чувствительностью к

изменению параметров объекта управления и обеспечивающие требуемое качество работы системы при наличии высокочастотных входных воздействий.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе основные теоретические и практические результаты получены соискателем самостоятельно. Научный руководитель кандидат технических наук, доцент А. Г. Стрижнев принимал участие в постановке задачи и определении возможных путей решения. В публикациях с соавторами вклад автора определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на международной научной конференции «Информационные технологии и системы (ITS 2011)» (г. Минск, 2011 г.); 48-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Информационные технологии и управление» (г. Минск, 2012 г.); 10-й международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2012 г.); 7-й международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности» (г. Минск, 2012 г.); 11-й международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2013 г.); международной научной конференции «Информационные технологии и системы (ITS 2013)» (г. Минск, 2013 г.); международной научной конференции «Информационные технологии и системы (ITS 2014)» (г. Минск, 2014 г.); 51-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Информационные технологии и управление» (г. Минск, 2015 г.); международной научной конференции «Информационные технологии и системы (ITS 2015)» (г. Минск, 2015 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ, включая 15 статей в рецензируемых научных журналах, 12 – в сборниках материалов и тезисов международных и республиканских конференций. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 5,7 авторского листа. Отдельные вопросы исследования изложены в отчете по НИР.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, библиографического списка и шести при-

ложений. Общий объем работы составляет 202 страницы, из них 119 страниц основного текста. Диссертация содержит 72 рисунка на 30 страницах, 7 таблиц на 2 страницах, библиографический список из 154 источников на 14 страницах и 28 публикаций автора на 4 страницах, 6 приложений на 38 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении рассмотрена актуальность исследований, проведенных в диссертационной работе и направленных на повышение качества работы систем управления приводами поворотного-подъемных механизмов. Отмечено, что обеспечить высокое качество работы систем автоматического управления можно лишь при комплексном подходе, предполагающем учет нелинейностей механизмов, обеспечение точной идентификации объектов управления, в том числе при наличии различного рода ограничений, синтез корректирующих устройств, обеспечивающих требуемые показатели качества работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы цель и задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, показан уровень опубликования и апробирования результатов диссертации.

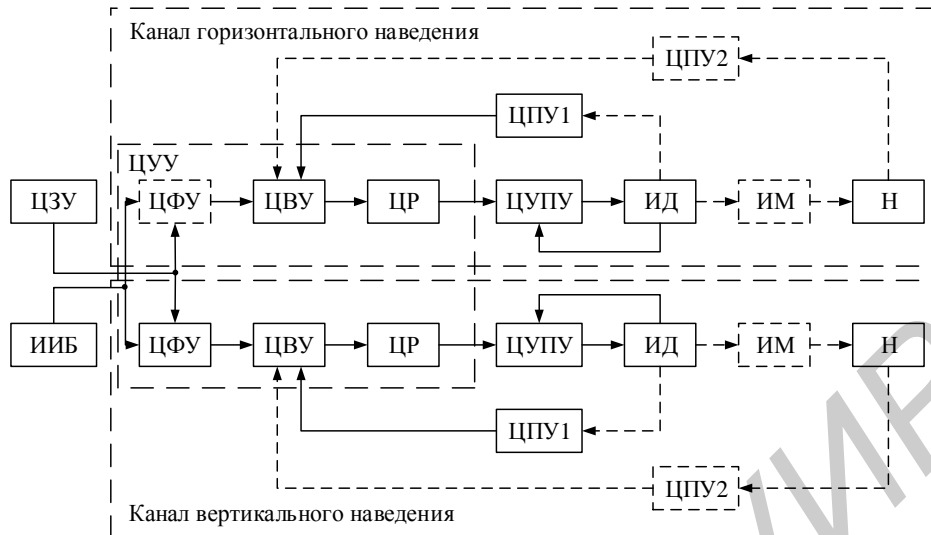
В **первой главе** рассмотрены современные системы автоматического управления (САУ) приводами. Выделены основные показатели качества, которые необходимо учитывать при разработке таких систем. Для более качественной оценки работы, анализа и выбора регуляторов предлагается [15, 27] использовать комплексный показатель качества, выражение которого имеет вид

$$PI = k_1 \frac{p_1}{p_{10}} + k_2 \frac{p_2}{p_{20}} + \dots + k_n \frac{p_n}{p_{n0}},$$

где $k_1 \dots k_n$ – весовые коэффициенты; $p_1 \dots p_n$ – показатели качества; $p_{10} \dots p_{n0}$ – желаемые (требуемые) показатели качества; n – количество выбранных показателей качества.

На основе результатов сравнительного анализа различных элементов и устройств современных систем управления разработана структурная схема цифровой следящей системы гиростабилизированного комплекса наведения с поворотным-подъемным механизмом, где в качестве исполнительного элемента предложено использовать электропривод с вентильным двигателем. Разработанная структурная схема приведена на рисунке 1.

На основе анализа разработанной структурной схемы (см. рисунок 1) сформулированы задачи для дальнейших исследований.



ЦЗУ – цифровое задающее устройство; ИИБ – инерциальный измерительный блок; ЦФУ – цифровое формирующее устройство; ЦВУ – цифровое вычислительное устройство; ЦР – цифровой регулятор; ЦПУ1,2 – цифровой преобразователь угла; ЦУПУ – цифровое усилительно-преобразовательное устройство; ИД – исполнительный двигатель; ИМ – исполнительный механизм; Н – нагрузка; ГН – горизонтальное наведение; ВН – вертикальное наведение

Рисунок 1. – Структурная схема цифровой следящей системы гиросtabilизированного комплекса наведения

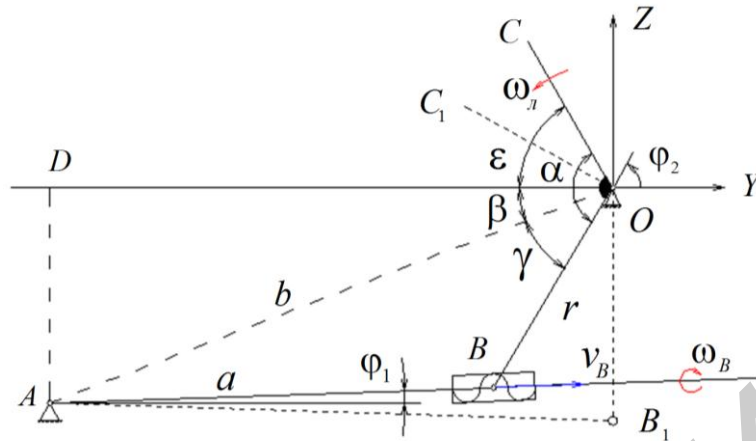
Во второй главе исследованы электро- и гидроприводы, содержащие сложные и многосвязные рычажные механизмы. На рисунке 2 приведена упрощенная схема рычажной части механической передачи привода вертикального наведения специального транспорта. При вращении винтовой передачи AB с постоянной скоростью ω_B происходит линейное перемещение подвижной гайки B с постоянной скоростью v_B и поворот рычага BO и качающейся части CO с изменяющейся скоростью ω_D . Следовательно, в процессе работы привода изменяется коэффициент преобразования $K_{п2}$ рычажной части механической передачи, и эти изменения нужно определить и учитывать. Получено выражение $K_{п2}$, которое имеет вид

$$K_{п2} = pz / [2\pi r \sin(\alpha - \varphi_1 - \varepsilon)], \quad (1)$$

где p – шаг винтовой передачи; z – число заходов резьбы винтовой передачи; $\varphi_1 = \arctg[(AD - r \sin(\alpha - \varepsilon)) / (DO - r \cos(\alpha - \varepsilon))]$.

В тех случаях, когда требуется стабилизировать коэффициент преобразования $K_{п2}$ и исключить влияние его нелинейной зависимости на работу электропривода, удобно использовать нормированный коэффициент преобразования, вычисленный для среднего угла $\varepsilon_{cp} = 33^\circ$:

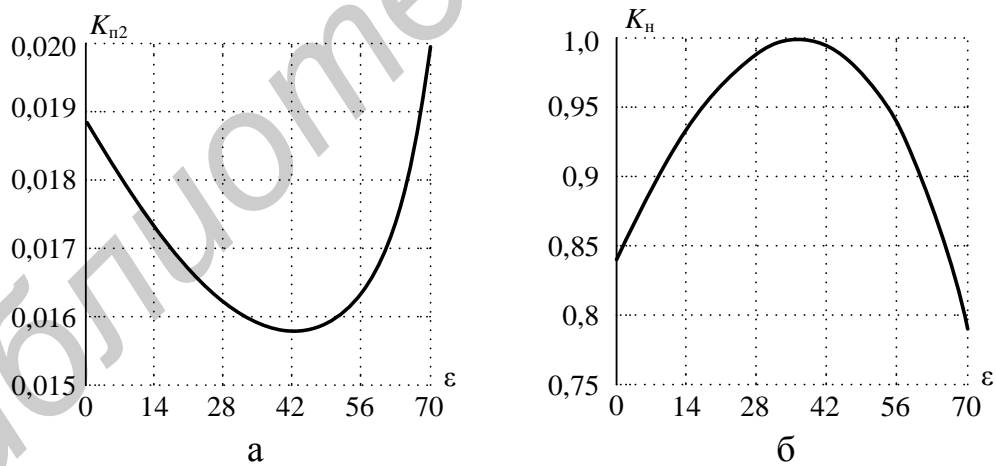
$$K_H = K_{п2(\varepsilon=33)} / K_{п2} = \sin(\alpha - \varphi_1 - \varepsilon). \quad (2)$$



AB – винтовая передача; BO – приводной рычаг; CO – качающаяся часть; a – длина расстояния AB ; b – длина опорного расстояния AO ; r – длина поворотного рычага BO ; α – угол BOC ; β – угол AOY ; γ – угол AOB ; ϵ – угол COY ; φ_1 – угол поворота винтовой передачи AB относительно продольной оси Y поворотного устройства; φ_2 – угол поворота рычага AB относительно продольной оси Y поворотного устройства; ω_B – угловая скорость вращения винтовой передачи AB ; v_B – скорость движения подвижной гайки B вдоль винтовой передачи AB ; ω_O – угловая скорость поворота CO вокруг оси O

Рисунок 2. – Упрощенная схема механической передачи рычажной части привода вертикального наведения

Зависимости коэффициентов (1), (2) от угла возвышения ϵ представлены на рисунке 3.



а – коэффициент K_{n2} ; б – коэффициент K_n

Рисунок 3. – Зависимость коэффициентов преобразования от угла ϵ

В диссертационной работе были исследованы сложные [5, 26] и многосвязные [11] рычажные механизмы. Установлено, что величины изменения нелинейного коэффициента преобразования в сложных рычажных механизмах составляют 1,16 раза, а в многосвязных – достигают 5-ти раз. Для повышения качества управления, точности математической модели и увеличения срока службы механизмов предложено на этапе идентификации выделять для исследования зону наибольшей линейности и использовать полученные аналитиче-

ские выражения нормированных коэффициентов преобразования при построении имитационной модели объекта управления. В случае необходимости компенсации влияния выявленных нелинейностей предложено на основе полученных выражений осуществлять модуляцию сигналов управления электродвигателем или гидроцилиндром.

Проведена оценка и компенсация влияния неуравновешенной нагрузки на точность работы цифровой следящей системы [4, 22]. Процесс оценки предполагает перевод системы в тестовый режим работы. На вход подается управляющий тестовый сигнал $a(t)$, линейно изменяющийся с постоянной малой скоростью во всем диапазоне рабочих значений от a_{\min} до a_{\max} и обратно, и записываются текущие значения ошибки e_i и угла φ_i поворота нагрузки. График изменения тестового управляющего сигнала $a(t)$ и ошибки для двух направлений движения показан на рисунке 4.

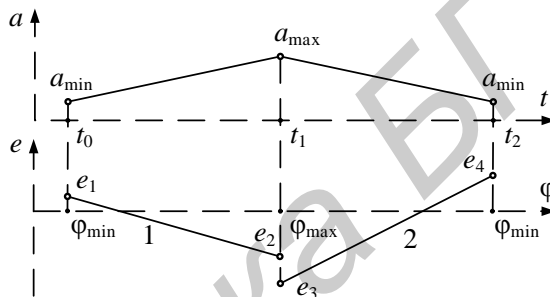
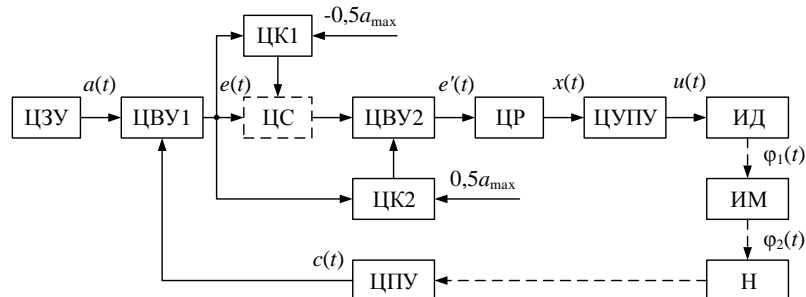


Рисунок 4. – Тестовый управляющий сигнал и сигнал ошибки САУ

Полученные данные (рисунок 4, графики 1, 2) аппроксимируются полиномами, которые затем используются для компенсации отрицательных влияний неуравновешенной нагрузки. Экспериментально подтверждено уменьшение диапазона изменений ошибки системы более чем в 4 раза.

Разработан способ компенсации ошибки перехода [8], которая может возникать при работе системы управления в режиме кругового слежения из-за инерционности механических элементов при наличии внешних возмущений колебательного характера. Проведенный анализ существующих технических решений помог найти новый способ, основанный на использовании сигнала ошибки системы. Для этого была разработана САУ, структурная схема которой приведена на рисунке 5.



ЦС – цифровой сумматор; ЦК 1,2 – цифровой компаратор

Рисунок 5. – Структурная схема САУ, компенсирующая ошибку перехода с использованием сигнала ошибки системы

Во время работы системы в режиме кругового слежения за счет инерционности элементов (ИД, ИМ, Н) имеет место запаздывание во времени выходного сигнала $c(t)$ относительно управляющего $a(t)$. Это приводит к тому, что на выходе ЦВУ возникает сигнал ошибки $|c_i| > 0,5a_{\max}$ и в зависимости от направления изменения сигнала $a(t)$ срабатывают компараторы ЦК 1 или ЦК 2, выдавая логическую «1» на устройства ЦС и ЦВУ 2 соответственно. В результате ЦС будет выполнять сложение $e_i + a_{\max}$, а ЦВУ 2 – вычитание $e_i - a_{\max}$ при наличии логической «1» или $e_i + a_{\min}$, $e_i - a_{\min}$ – при ее отсутствии. В результате ошибка перехода не возникает и обеспечивается устойчивая работа системы, в том числе при наличии колебательных возмущений. Предложенный способ отличается от рассмотренных прототипов более простой структурой САУ и устойчивостью работы [8]. Применение данного способа компенсации дает возможность использовать в режиме кругового слежения однооборотные энкодеры, что позволяет уменьшить конечную стоимость системы

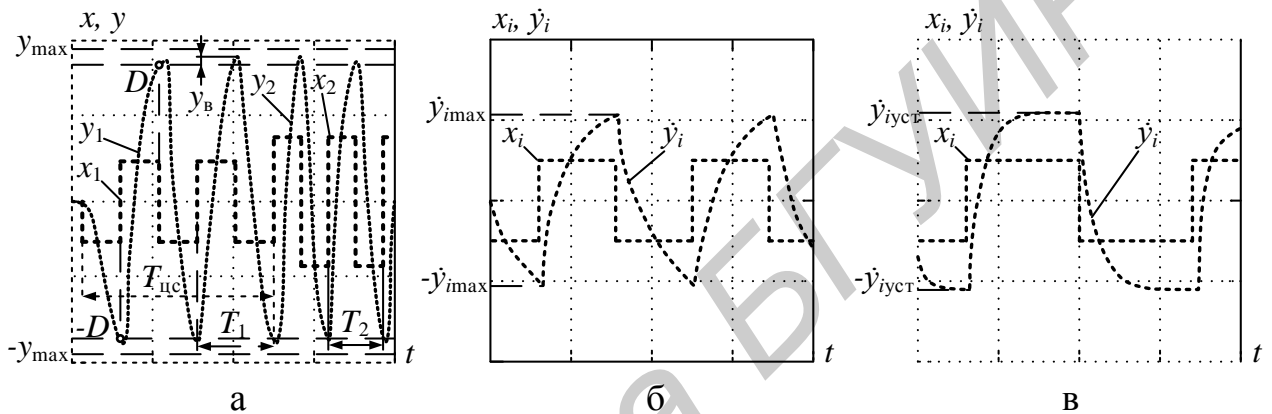
В третьей главе на основе математических моделей различных элементов электропривода определена результирующая структура передаточной функции электропривода, учитывающая наличие упругих связей механической подсистемы.

Рассмотрены экспериментальные методы идентификации объектов управления (ОУ) по временным и частотным характеристикам. Проведена идентификация горизонтального канала гиросtabilизированного комплекса наведения, подтверждающая применимость данных методов для определения передаточных функций ОУ. Вместе с тем установлено, что данные методы не применимы, если объект имеет нелинейный коэффициент усиления, неуравновешенность (несбалансированность) механизмов и др. или работает в ограниченном диапазоне изменения выходных координат.

В качестве одного из способов решения задачи может быть использована методика [1, 17] идентификации по переходной характеристике замкнутой системы, которая позволяет определять передаточные функции ОУ, содержащих несбалансированные механизмы или работающих в ограниченном диапазоне изменения значений выходных координат. Данная методика основана на свойствах замкнутой системы сохранять устойчивость при действии различных нелинейностей. Используя выражения передаточных функций типовых динамических звеньев и замкнутой САУ, определяются передаточные функции объектов управления. Вместе с тем в силу особенностей замкнутой системы данная методика неприменима для идентификации ОУ высоких порядков и может использоваться в случаях, когда не предъявляются высокие требования к точности идентификации.

Для получения более точных моделей ОУ, в том числе передаточных функций объектов высоких порядков, а также учета нелинейных свойств ОУ разработана методика идентификации нелинейных объектов управления [12, 27]. Она содержит несколько последовательно выполняемых этапов: снятие и

построение регулировочной характеристики; снятие и построение логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и фазочастотных (ЛФЧХ) характеристик, определение передаточной функции ОУ. При снятии регулировочных характеристик (рисунок 6, а) на вход ОУ подаются ступенчатые сигналы x_i равномерно изменяемой амплитуды и, не доходя 5–10 % до максимума заданного диапазона $|y_{\max}|$ выходной координаты y , в точке $|D|$ осуществляется изменение знака входных сигналов x_i . Причем координаты точки $|D|$ в процессе эксперимента не изменяются.



T_{yc} – цикл сканирования; y_B – амплитуда выбега; D – точка реверсирования; t_i – период повторения; x_i – входные сигналы; y_i – выходные сигналы;

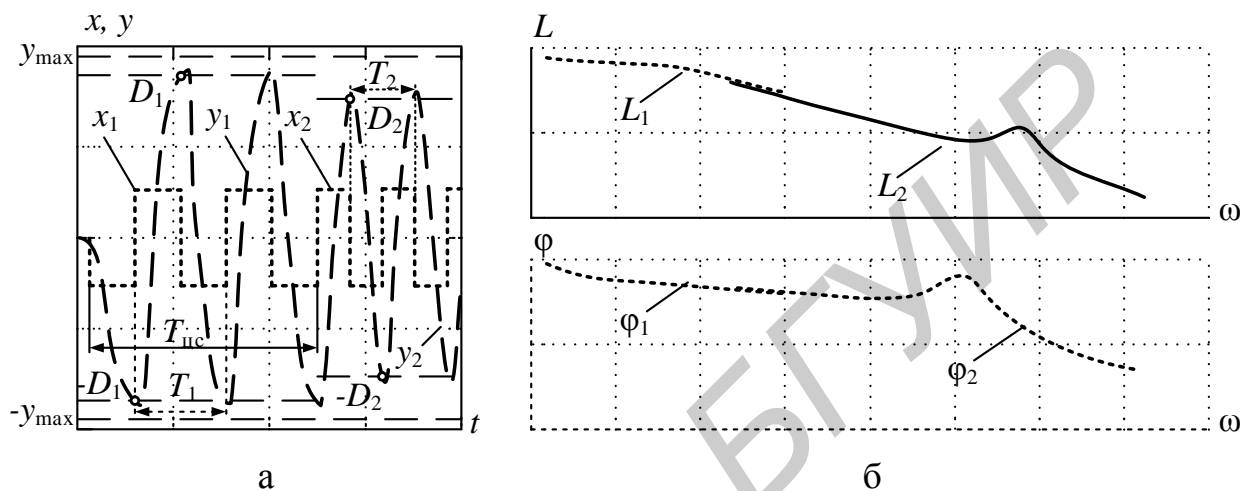
а – выбор точки реверсирования; б – определение максимальной скорости;
в – определение установившейся скорости

Рисунок 6. – Входные и выходные сигналы при снятии регулировочных характеристик

При этом образуются входные сигналы x_i , имеющие форму меандра, с периодом повторения T_i , а выходные сигналы y_i оказываются «привязанными» к рабочему диапазону $[-y_{\max}; y_{\max}]$. Изменение амплитуды ступенчатых сигналов осуществляется через каждый цикл сканирования T_{yc} , минимальное время которого получается при движении в одну и другую сторону. В зависимости от диапазона выходной координаты $|y_{\max}|$ и инерционных свойств ОУ на его выходе могут образоваться максимальные (рисунок 6, б) или установившиеся (рисунок 6, в) значения выходной величины, которые затем используются для построения соответствующих РХ. Для дальнейших исследований производится нормирование и аппроксимация полученной характеристики с использованием полиномиальной или кусочно-линейной аппроксимации.

Получение ЛАЧХ и ЛФЧХ также осуществляется при помощи специального входного сигнала. При этом координаты точки реверсирования D_i (рисунок 7, а) изменяются от минимальной до максимально возможной величины, и тем самым обеспечивается регулирование частоты ($f_i = 1/T_i$) входных и выходных сигналов ОУ.

Следует отметить, что данный способ в сравнении с классическим обеспечивает получение характеристик в более узком диапазоне частот, поэтому предлагается в низкочастотной области использовать предложенный метод снятия характеристик, а в высокочастотной – классический метод. Путем совмещения полученных характеристик образуются результирующие ЛАЧХ и ЛФЧХ (рисунок 7, б).



$D_{1,2}$ – точка реверсирования; L_i – ЛАЧХ; ϕ_i – ЛФЧХ;

а – входные и выходные сигналы; б – результирующие характеристики

Рисунок 7. – Получение частотных характеристик ОУ

Полученные частотные характеристики позволяют более точно определить не только передаточную функцию ОУ, но и восстановить полную регулировочную характеристику, определить переменный коэффициент передачи и получить модель, адекватную по поведению реальному нелинейному ОУ. Для автоматизации процессов исследования нелинейных ОУ, работающих в заданном диапазоне выходных координат, и реализации этапов предложенной методики был разработан специальный алгоритм тестирования.

Работа предложенной методики была проверена на примере канала вертикального наведения гиросtabilизированного комплекса наведения. Получены регулировочные и частотные характеристики, с применением которых была определена передаточная функция ОУ:

$$W_{\text{ОВВН}}(s) = \frac{K(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}{s(T_3 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}, \quad (3)$$

где $K = 66,113 \text{ с}^{-1}$; $T_1 = 0,0132 \text{ с}$; $T_2 = 0,0116 \text{ с}$; $T_3 = 0,4 \text{ с}$; $\xi_1 = 0,35$; $\xi_2 = 0,21$.

С использованием полученных характеристик и передаточной функции (3) были восстановлены полная регулировочная характеристика по скорости и переменный коэффициент передачи ОУ. С применением предложенной методики также были проведены исследования ОУ, содержащих в качестве исполнительного элемента вентильный двигатель малой мощности [13] и двухфазный асин-

хронный двигатель [14], которые показали эффективность разработанной методики и возможность ее применения для идентификации различных ОУ при невозможности применения классических методов.

Для синтеза корректирующих устройств и исследования качества работы канала вертикального наведения поворотного-подъемного механизма была создана его имитационная модель в среде MATLAB/Simulink, учитывающая свойства ОУ, в том числе нелинейные. Проведена верификация модели на среднеквадратичного функционала качества которая показала совпадение модели и реального объекта на уровне 98,9 %.

В четвертой главе рассмотрен синтез различных цифровых регуляторов для системы управления гиросtabilизированного комплекса наведения. Синтез цифрового ПИД-регулятора осуществлялся с применением метода Зиглера–Никольса для определения начальных значений коэффициентов, а окончательная настройка проводилась с помощью блока динамической оптимизации Signal Constraint пакета программ MATLAB.

Выбрана структура и осуществлена настройка регулятора с нечеткой логикой функционирования. В качестве лингвистических переменных выбраны ошибка системы, скорость изменения ошибки и ускорение ошибки, которые характеризуются тремя терм-множествами (отрицательная, нулевая, положительная) и описываются функциями принадлежности треугольной формы. Для фаззификации использован «минимаксный» метод логического решения, для дефаззификации – метод определения «центра тяжести» результирующей функции принадлежности. Для настройки коэффициентов также использован блок Signal Constraint.

Осуществлен автоматизированный синтез [3, 19, 21] цифрового регулятора на основе метода переменного коэффициента усиления, ключевой особенностью которого является использование дискретных передаточных функций ОУ, для определения которых используются автоматизированные методы дискретизации пакета MATLAB, и в результате получается передаточная функция вида

$$WH_{OY}(z) = \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}}, \quad (4)$$

где c_n, d_n – постоянные коэффициенты.

На основе выражения (4) рассчитывается передаточная функция цифрового регулятора:

$$W_P(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 - k_1 z^{-1} - k_2 z^{-2} - \dots - k_n z^{-n}}, \quad (5)$$

где $b_1 = d_1; b_2 = d_2; b_n = d_n; k_1 = c_1 K_0; k_2 = c_2 K_0; k_n = c_n K_0; K_0 = 1/(c_1 + \dots + c_n)$.

Предложен алгоритм, позволяющий получить дискретную передаточную функцию ОУ, рассчитать цифровой регулятор и осуществить математическое моделирование работы системы управления и ее элементов.

Разработан аналитический метод синтеза цифрового регулятора в цепи обратной связи, основанный на использовании выражений частотных характеристик типовых динамических звеньев и корректирующих свойств гибкой обратной связи. Процесс синтеза данного регулятора предполагает повышение быстродействия прямой цепи системы, коррекцию вида переходного процесса и реализацию регулятора в цифровом виде. Повысить быстродействие САУ проще всего с помощью дополнительного усилителя K_y , включенного в прямую цепь системы. Структурная схема САУ с дополнительным усилителем и регулятором в обратной цепи приведена на рисунке 8.

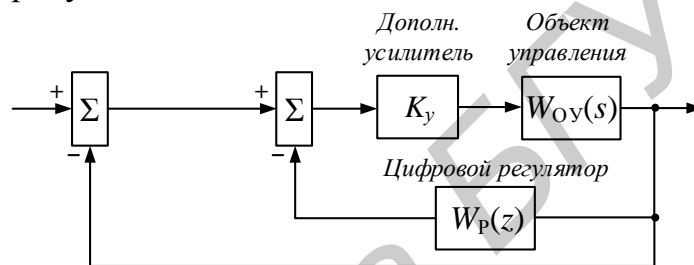


Рисунок 8. – Структурная схема САУ с дополнительным усилителем и регулятором в цепи обратной связи

На начальном этапе с помощью выражений амплитудных и фазовых характеристик находится значение коэффициента K_y , при котором обеспечивается максимальное быстродействие системы. Для коррекции вида переходного процесса замкнутой системы определяется структура передаточной функции корректирующей обратной связи вида

$$Q(s) = Q_a(s)Q_d(s)Q_f(s), \quad (6)$$

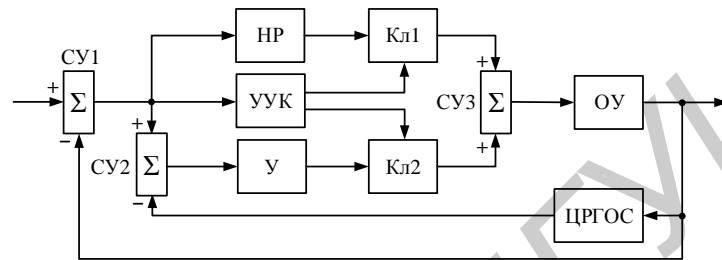
где $Q_a(s)$, $Q_d(s)$, $Q_f(s)$ – передаточные функции апериодического, дифференцирующего и форсирующего звеньев соответственно.

Определены аналитические выражения для нахождения передаточных функций составных звеньев выражения (6). Для окончательной настройки коэффициентов регулятора предлагается использовать блок Signal Constraint. После настройки производится дискретизация передаточной функции регулятора с помощью автоматизированных методов пакета программ MATLAB.

С использованием комплексного показателя качества PI осуществлен сравнительный анализ качества работы САУ с различными регуляторами. В процессе анализа исследовалась зависимость величины PI от изменения коэффициента усиления K ОУ (3), постоянной времени T_3 наиболее инерционного звена и амплитуды входного сигнала. Установлено, что регуляторы обеспечивают различную эффективность в зависимости от изменения параметров системы. Даны ре-

комендации по использованию цифровых регуляторов для различных применений. Следует отметить, что эффективность работы регулятора в цепи обратной связи на 31,9 % выше при обработке сигналов большой амплитуды, в 2,24 раза – при изменении коэффициента усиления объекта, на 39 % – при уменьшении постоянной времени объекта. Это дает возможность рекомендовать его к применению для коррекции ОУ с изменяющимися параметрами.

Для обеспечения качественной работы САУ в различных режимах предложена система переменной структуры, схема которой приведена на рисунке 9.



СУ1-3 – сравнивающее устройство; НР – нечеткий регулятор; УУК – устройство управления ключами; У – усилитель; Кл1, Кл2 – ключ; ОУ – объект управления; ЦРГОС – цифровой регулятор с гибкой обратной связью

Рисунок 9. – Структурная схема системы переменной структуры

Схема (рисунок 9) включает в себя две структуры: первая содержит нечеткий регулятор и служит для обработки ошибки рассогласования, не больше заданной e_1 ; вторая структура содержит цифровой регулятор в обратной цепи и служит для обработки ошибки рассогласования, превышающей e_1 . В процессе функционирования системы работают оба регулятора, а переключение осуществляется по выходу, тем самым уменьшается влияние ненулевых начальных условий на работу системы. Для выбора величины порога переключения проводилась оценка величины комплексного показателя качества при входных воздействиях различной амплитуды, в результате чего выбран порог переключения на уровне $e_1 = 0,3$ град. Для проверки качества работы системы переменной структуры проведено исследование величины комплексного показателя качества при вариации коэффициента усиления и постоянной времени ОУ, а также амплитуды входного сигнала. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что система переменной структуры обеспечивает хорошее качество работы, сочетая в себе достоинства регуляторов, входящих в ее состав.

Исследована устойчивость систем управления при воздействии входных сигналов с частотами, превышающими полосу пропускания системы. С помощью имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink были исследованы три независимые САУ: с нечетким регулятором, регулятором в обратной цепи и система переменной структуры. В процессе эксперимента на входы систем с помощью блока Chirp Signal подавались синусоидальные воздействия $x(t) = X_{\text{вх}} \sin \omega t$ линейно изменяющейся частотой ω и различной амплитудой ($X_{\text{вх}} = 0,1$ град, $X_{\text{вх}} = 1$ град, $X_{\text{вх}} = 5$ град). Максимальная частота ω_{max} была

выбрана на порядок больше максимальной граничной частоты ($\omega_{пр} = 71$ рад/с), и ее величина составила $\omega_{max} = 710$ рад/с. Установлено, что при обработке таких сигналов на выходе системы могут возникать незатухающие колебания и самопроизвольный уход из равновесного состояния, что приводит к неустойчивости и срывам слежения. Использование регулятора в обратной связи вследствие наличия фильтрующих свойств объекта управления позволяет обеспечить устойчивость системы при воздействии входных сигналов любой частоты. Для решения проблемы устойчивости других регуляторов предложено использовать формирующие устройства, которые могут быть представлены различными цифровыми фильтрами. Предложены методики расчета формирующих устройств на основе фильтров с использованием аналогов колебательных звеньев и фильтров Кауэра. Проведены исследования, показывающие, что применение цифровых формирующих устройств обеспечивает устойчивость системы при воздействии высокочастотных входных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе результатов сравнительного анализа различных элементов и устройств современных систем управления разработана структурная схема цифровой следящей системы гиростабилизированного комплекса наведения с поворотноподъемным механизмом, где в качестве исполнительного элемента предложено использовать вентильный электропривод [27].

2. Разработан способ определения и учета влияния нелинейностей различных приводов с рычажными механизмами. Установлено, что величины изменения нелинейного коэффициента преобразования в сложных рычажных механизмах достигают 1,16 раза, а в многозвенных механизмах – 5-ти раз. Для повышения качества управления, точности математической модели и увеличения срока службы механизмов предложено на этапе идентификации выделять для исследования зону наибольшей линейности и использовать полученные аналитические выражения нормированных коэффициентов преобразования при построении имитационной модели объекта управления. В случае необходимости компенсации влияния выявленных нелинейностей предложено на основе полученных выражений осуществлять модуляцию сигналов управления. Разработан способ компенсации ошибки перехода, возникающей при работе системы в режиме кругового слежения, который позволяет обеспечить устойчивую работу системы, исключить срывы слежения и отличается от рассмотренных прототипов более простой структурой САУ и устойчивостью работы. Применение предложенного способа компенсации дает возможность использовать в режиме кругового слежения однооборотные энкодеры, что позволяет уменьшить конечную стоимость системы [2, 4, 5, 8, 9, 11, 16, 22, 26, 27].

3. На основе математических моделей различных элементов электропривода определена результирующая структура передаточной функции с учетом упругих связей механической подсистемы. Разработана новая методика идентификации объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат,

особенностью которой является использование специального входного сигнала с учетом текущего положения привода. Данная методика дает возможность получить различные регулировочные и частотные характеристики, необходимые для определения передаточной функции объекта управления, а также аналитические выражения нормированных регулировочных характеристик и нелинейного коэффициента передачи, которые используются для построения адекватной имитационной модели. Для реализации методики разработан специальный алгоритм тестирования и программный комплекс, позволяющие построить модели объектов, для которых неприменимы классические методы идентификации. Представлена имитационная модель в среде MATLAB/Simulink и проведена ее верификация на основе среднеквадратичного функционала, которая показала совпадение с реальным объектом на уровне 98,9 – 99,0 % [1, 12, 13, 14, 17, 27].

4. Осуществлен синтез различных регуляторов для цифровой системы управления гиросtabilизированного комплекса наведения: ПИД-регулятора, нечеткого регулятора и регулятора на основе метода переменного коэффициента усиления. Предложен аналитический метод синтеза цифрового регулятора в цепи обратной связи, в котором используются выражения частотных характеристик типовых динамических звеньев и корректирующие свойства гибкой обратной связи. Проведен сравнительный анализ работы данного регулятора с другими при вариации (ослаблении и усилении в 10 раз) амплитуды входного ступенчатого сигнала, коэффициента усиления и постоянной времени объекта управления. В результате анализа установлено, что эффективность работы регулятора в цепи обратной связи на 31,9 % выше при отработке сигналов большой амплитуды, в 2,24 раза – при изменении коэффициента усиления объекта, на 39 % – при уменьшении постоянной времени объекта. Предложена структурная схема системы с переменной структурой, применение которой обеспечивает сочетание достоинств обоих регуляторов, входящих в ее состав, что позволяет обеспечить эффективную работу систем в различных режимах. Исследованы особенности работы системы управления при воздействии входных сигналов с частотами, превышающими полосу пропускания системы. Установлено, что регулятор в цепи обратной связи обеспечивает устойчивую работу системы при воздействии входных сигналов любой частоты. При использовании других регуляторов предложено использовать цифровые формирующие устройства [3, 6, 7, 10, 18, 19, 20, 21, 24, 26, 27].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Эффективность результатов исследований подтверждена при выполнении опытно-конструкторских работ ОКР и решении различных производственных задач. Алгоритмы, методики и программы использованы при разработке и реализации САУ оптико-электронной системы, системы развертывания антенны РЛС, следящей системы антенны РЛС и внедрены в серийно выпускаемой продукции на предприятии НПО «ОКБ ТСП».

Разработанная структурная схема цифровой следящей системы, а также предложенные алгоритмы и программы использованы при разработке гиросtabilизи-

ванного комплекса наведения на предприятия ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей». Предложенные алгоритмы апробированы на опытно-конструкторском образце и внедрены в серийно выпускаемой продукции.

Научные результаты, полученные в работе, могут также использоваться в системах управления другими поворотными-подъемными механизмами, содержащими рычажные механизмы различной сложности, объекты управления с ограниченным диапазоном изменения выходных координат, неуравновешенную нагрузку или однооборотные абсолютные энкодеры. Применение цифрового регулятора с гибкой обратной связью позволяет обеспечить нечувствительность систем к изменению параметров при сохранении высокого качества работы, а также устойчивость системы при воздействии высокочастотных входных сигналов. Получены акты о внедрении материалов диссертационной работы на предприятиях ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей» и НПО «ОКБ ТСП».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Стрижнев, А.Г. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы / А.Г. Стрижнев, А.В. Марков, А.Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5(67). – С. 65–72.
2. Стрижнев, А.Г. Синтез напряжений многократных ШИМ, созданных по трапецеидальной и синусоидальной функциям построения / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Энергетика – изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 1. – С. 32–40.
3. Стрижнев, А.Г. Автоматизированный синтез цифровых регуляторов на основе дискретных передаточных функций объектов управления / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информатика. – 2013. – № 3(39). – С. 105–114.
4. Стрижнев, А.Г. Повышение точности работы цифровой следящей системы, содержащей неуравновешенную нагрузку / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 10–14.
5. Стрижнев, А.Г. Нелинейности сложных рычажных механизмов электро- и гидроприводов / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 12–19.
6. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора для объекта управления пятого порядка с применением оптимальных управляющих воздействий / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Информатика. – 2014. – № 1(41). – С. 59–67.
7. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора, включенного параллельно единичной обратной связи / А.Г. Стрижнев, М.К. Хаджинов, А.Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4(82). – С. 80–86.
8. Компенсация ошибки перехода цифровой следящей системы при круговом слежении / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Информатика. – 2014. – № 2(42). – С. 98–108.

9. Стрижнев, А.Г. Синтез напряжений равномерных широтно-импульсных модуляций при временном регулировании / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович, А.А. Шихов // Энергетика – изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 4. – С. 23–30.

10. Стрижнев, А.Г. Система автоматического управления переменной структуры с цифровыми регуляторами / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Наука и техника. – 2015. – № 4 – С. 37–44.

11. Стрижнев, А.Г. Подходы к определению и компенсации нелинейностей электро- и гидроприводов, содержащих многозвенные рычажные механизмы / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Новости науки и технологий. – 2015. – № 2(33) – С. 41–48.

12. Стрижнев, А.Г. Метод исследования нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат / А.Г. Стрижнев, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Информатика. – 2015. – № 3(47) – С. 81–89.

13. Стрижнев, А.Г. Исследование вентильного электропривода, работающего в заданном диапазоне значений выходных координат / А.Г. Стрижнев, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Электроника Инфо. – 2015. – № 7 – С. 47–54.

14. Стрижнев, А.Г. Исследование электропривода с двухфазным асинхронным двигателем, работающего в заданном диапазоне выходных координат / А.Г. Стрижнев, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Новости науки и технологий. – 2015. – № 3 (34) – С. 17–29.

15. Русакович, А.Н. Сравнительный анализ качества работы цифровых регуляторов в системе управления вентильным электроприводом / А.Н. Русакович // Новости науки и технологий. – 2015. – № 4(35) – С. 47–53.

Статьи в сборниках материалов конференций и тезисов докладов

16. Стрижнев, А.Г. Нелинейности простейших рычажных механизмов гидроприводов и их компенсация / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Информационные технологии и системы 2011: материалы международной научной конференции / БГУИР. – Минск, 2011. – С. 90–91.

17. Стрижнев, А.Г. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информационные технологии и управление: материалы 48-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 86.

18. Стрижнев, А.Г. Синтез цифровых регуляторов, обеспечивающих желаемый переходной процесс САУ / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Информационные технологии и управление: материалы 48-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 87.

19. Стрижнев, А.Г. Автоматизированный синтез цифровых регуляторов в среде MATLAB / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Международной научно-технической конференции / БНТУ. – Минск, 2012. – С. 293.

20. Стрижнев, А.Г. Автоматизированная настройка цифровых регуляторов САУ для радиоэлектронной техники / А.Г. Стрижнев, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Международной научно-технической конференции / БНТУ. – Минск, 2012. – С. 294.

21. Стрижнев, А.Г. Автоматизированный синтез цифровых регуляторов для систем автоматического управления / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информационные технологии в промышленности: материалы 7-й Международной научно-технической конференции / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2012. – С. 203.

22. Определение и компенсация влияний неуравновешенной нагрузки на работу цифровой следящей системы / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции / БНТУ. – Минск, 2013. – С. 212.

23. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора для объекта управления пятого порядка с использованием оптимальных управляющих воздействий / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Информационные технологии и системы 2013: материалы международной научной конференции / БГУИР. – Минск, 2013. – С. 98–99.

24. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора, включенного параллельно единичной обратной связи / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информационные технологии и системы 2014: материалы международной научной конференции / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 86–87.

25. Стрижнев, А.Г. Система автоматического управления переменной структуры с цифровыми регуляторами / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информационные технологии и системы 2014: материалы международной научной конференции / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 88–89.

26. Стрижнев, А.Г. Определение нелинейностей сложных рычажных механизмов электро- и гидроприводов / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информационные технологии и управление: материалы 51-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 38.

27. Стрижнев, А.Г. Эффективные методы синтеза систем управления приводами поворотного-подъемных механизмов / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информационные технологии и системы 2015: материалы международной научной конференции / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 80–81.

Отчеты о НИР

28. Разработка эффективных алгоритмов и систем управления генерированием и потреблением электроэнергии в различных отраслях промышленности: отчет о НИР (заключ.) / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; рук. темы А.П. Кузнецов. – Минск, 2015. – 214 с. – № ГР 20143498.



РЭЗЮМЭ

Русаковіч Аляксей Мікалаевіч

Ідэнтыфікацыя і сінтэз сістэм кіравання прывадамі паваротна-пад'ёмных механізмаў

Ключавыя словы: паваротна-пад'ёмны механізм; паказчыкі якасці; электрапрывад; вентыльны рухавік; рычаговыя механізмы; нелінейнасці; памылка пераходу; пругкія сувязі; матэматычныя мадэлі; лічбавыя рэгулятары; зваротная сувязь; сістэма зменнай структуры.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка метадаў, алгарытмаў ідэнтыфікацыі і сінтэзу сістэм кіравання прывадамі паваротна-пад'ёмных механізмаў, якія забяспечваюць павышэнне якасці іх працы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны спосаб вызначэння і ўліку ўплыву нелінейнасцей розных прывадаў з рычаговымі механізмамі, які заснаваны на аналітычным вызначэнні каэфіцыентаў пераўтварэння названых механізмаў і дазваляе забяспечыць улік ўплыву выяўленых нелінейнасцей на працу прывадаў пры сінтэзе сістэм кіравання.

Распрацаваны спосаб кампенсацыі памылкі пераходу, які заснаваны на выкарыстанні сігналу бягучай памылкі сістэмы і дазваляе забяспечыць устойлівасць сістэм з аднабаротным энкодэрам у рэжыме кругавога сачэння і адрозніваецца больш простаай структурай сістэмы кіравання.

Распрацавана метадыка ідэнтыфікацыі нелінейных аб'ектаў кіравання, якія працуюць у зададзеным дыяпазоне выхадных каардынат, якая адрозніваецца фарміраваннем спецыяльнага уваходнага сігналу з улікам бягучага становішча прывада і дазваляе ажыццявіць поўны цыкл ідэнтыфікацыі аб'ектаў кіравання дадзенага класа.

Распрацаваны аналітычны метады сінтэзу лічбавага рэгулятара ў зваротнай сувязі, які адрозніваецца выкарыстаннем выказаў частотных характарыстык тыпавых дынамічных зв'янаў і ўласцівасцей гібкай зваротнай сувязі і дазваляе праектаваць рэгулятары з нізкай адчувальнасцю да змянення параметраў аб'екта кіравання і забяспечваюць патрэбную якасць кіравання пры наяўнасці высокачастотных уваходных уздзеянняў.

РЕЗЮМЕ

Русакович Алексей Николаевич

Идентификация и синтез систем управления приводами поворотно-подъемных механизмов

Ключевые слова: поворотно-подъемный механизм; показатели качества; электропривод; вентильный двигатель; рычажные механизмы; нелинейности; ошибка перехода; упругие связи; математические модели; цифровые регуляторы; обратная связь; система переменной структуры.

Целью работы является разработка методов, алгоритмов идентификации и синтеза систем управления приводами поворотно-подъемных механизмов, обеспечивающих повышение качества их работы.

Полученные результаты и их новизна: разработан способ определения и учета влияния нелинейностей различных приводов с рычажными механизмами, основанный на аналитическом определении коэффициентов преобразования названных механизмов, который позволяет обеспечить учет влияния выявленных нелинейностей на работу приводов при синтезе систем управления.

Разработан способ компенсации ошибки перехода, основанный на использовании сигнала текущей ошибки системы, который позволяет обеспечить устойчивую работу следящих систем с однооборотным энкодером в режиме кругового слежения и отличается более простой структурой системы управления.

Разработана методика идентификации нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат, которая отличается применением специального входного сигнала с учетом текущего положения привода и позволяет осуществить полный цикл идентификации объектов управления данного класса.

Разработан аналитический метод синтеза цифрового регулятора в цепи обратной связи, отличающийся использованием выражений частотных характеристик типовых динамических звеньев и свойств гибкой обратной связи и позволяющий проектировать регуляторы с низкой чувствительностью к изменению параметров объекта управления и обеспечивающие требуемое качество работы системы при наличии высокочастотных входных воздействий.

SUMMARY

Aliaksei N. Rusakovich

Identification and synthesis of control systems for turning-lifting mechanism's drives

Keywords: turning-lifting mechanism; quality specifications; electric drive; BLDC motor; lever mechanisms; nonlinearity; transition error; elastic feedback; mathematical models; digital controllers; feedback; reconfigurable system.

The aim is to develop methods and algorithms of identification and synthesis of control systems of turning-lifting mechanism's drives for the improvement of their operation quality.

The results obtained and their novelty: The method for determining and account of nonlinearities effect of various drives with lever mechanisms based on analytical determination of conversion coefficients of these mechanisms and allow to ensure account the nonlinearity effect was developed.

The method for compensation of servo system circular tracking transition error based on using of current error signal, allowing to provide stability of system with single-turn encoder in the circular mode of operation and has simpler control system structure was developed.

The method for identification of nonlinear plants operating within the specified range of output coordinates values were developed. This method is based on a special input signal that depended on the current position and allows to make the complete identification process for these plants.

An analytical method for the synthesis of the digital feedback controller based on using of the frequency characteristics of typical dynamic links and elastic feedback and allow designing robust controllers, which ensure the required performance if there are high-frequency input signals, was developed.

Научное издание

Русакович Алексей Николаевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ПРИВОДАМИ ПОВОРОТНО-ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (промышленность)

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. .

Формат 60x84 1/16
Отпечатано на ризографе.
Тираж экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. .
Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распро-
странителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровка, 6

Библиотека БГУИР