

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 62-50:681.516

ЛЕДНИК
Геннадий Васильевич

**УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПОДЪЕМНО-ПОВОРОТНЫМ
МЕХАНИЗМОМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (промышленность)

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

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

Официальные оппоненты: **ШИЛИН Леонид Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор, декан факультета информационных технологий и управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;

ОПЕЙКО Ольга Федоровна,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета

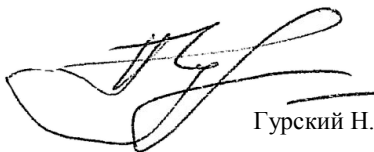
Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «6» апреля 2018 г. в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (+375 17) 293-95-64, e-mail: gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «1» марта 2018 г.

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



Гурский Н. Н.

© Ледник Г. В., 2018

© Белорусский национальный технический университет, 2018

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В подъемно-поворотных механизмах (ППМ) подвижных комплексов (ПК) широко применяются гидроприводы с объемным регулированием, так как они обеспечивают большие крутящие моменты при относительно небольших габаритных размерах, позволяют работать на полную мощность сразу же после запуска, обеспечивают бесступенчатое управление, дают возможность контролируемых движений с большой или предельно малой скоростью и высокой точностью.

Регулирование в объемном гидроприводе осуществляется изменением величины подачи аксиально-поршневого гидронасоса путем поворота люльки гидронасоса с помощью двухфазного асинхронного двигателя (ДАД) или двухкаскадного гидрораспределителя.

При построении цифровых систем управления с использованием ДАД обмотки двигателя питаются ШИМ напряжениями, которые в общем виде не являются синусоидальными. При этом появляются различные гармоники напряжения и тока, отличные от основной, которые вызывают ряд нежелательных эффектов, поэтому при формировании ШИМ напряжений нужно особое внимание уделить их гармоническому составу и изменению его при регулировании. Главным вопросом при оценке гармонического состава является выбор различных показателей качества и методики, по которой будет производиться анализ различных форм напряжений. Причем, используя аналитические подходы, важно совместить процесс синтеза, качественной оценки и микропроцессорной реализации.

Подъемные механизмы ПК передают возвратно-поступательные перемещения выходных звеньев гидропривода к управляемым устройствам (нагрузке) и тем самым выводят их на требуемую координату. Обычно в качестве подъемных механизмов используют рычажные механизмы, имеющие нелинейные характеристики. Практически в любом механизме встречаются такие естественные нелинейности, как нечувствительность, люфт, насыщение и их сочетания. Кроме того, рычажные механизмы гидроприводов обладают специфическими нелинейностями, не учет которых приводит к ошибкам идентификации данных механизмов и ухудшению качества их работы.

Также многие подъемные механизмы имеют неуравновешенную нагрузку, которая оказывает отрицательное влияние на точность функционирования систем управления. Определение неуравновешенной нагрузки с использованием информации от дополнительных датчиков является сложной задачей. Применение известных механических способов для определения и устранения неуравновешенности нагрузки имеет те же недостатки, к тому же их используют только на стадии изготовления механизмов и деталей. Кроме того, эти способы требуют применения специального оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры. Отмеченные недостатки не позволяют в полной мере использовать известные решения для повышения точности работы цифровых систем управления, имеющих неуравновешенную нагрузку.

Проектирование таких систем связано с высокими требованиями к точности слежения, позиционирования и быстродействию. Применение традиционных корректирующих устройств не всегда позволяет получить оптимальные переходные процессы в системе, а для систем с объектами управления (ОУ) высоких порядков и вовсе не обеспечивают заданные требования, поэтому требует разработки новых цифровых корректирующих устройств, обеспечивающих повышение эффективности работы данных систем.

В связи с этим разработка способа определения и методики компенсации влияния неуравновешенной нагрузки, нелинейностей однозвенных рычажных механизмов и цифровых регуляторов является актуальной научной задачей и представляет значительный научный и практический интерес.

Таким образом, назрела необходимость совершенствования цифровых систем управления (ЦСУ) ППМ, используемых на ПК, которая требует комплексного системного подхода и рассчитана на широкое применение информационных технологий. В работе уделено особое внимание выбору структуры цифровой электрогидравлической системы управления, исследованию нелинейностей приводных механизмов и влияния неуравновешенной нагрузки на функционирование цифровых систем управления, синтезу напряжений, питающих обмотки асинхронного двигателя, и качественной оценке их гармонического состава, идентификации объектов управления, разработке цифровых корректирующих устройств, а также моделированию работы ППМ и экспериментальным исследованиям.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Информационные системы и технологии» в учреждении образования «Белорусский национальный технический университет» в рамках научно-исследовательской работы НИОКТР «Модернизация и капитальный ремонт зенитного ракетного комплекса «Бук» (9К37)» № ГР 20043083 от 14.09.2004, выполняемой по поручению Президента Республики Беларусь от 02.03.2004 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 биомеханиче-

ских систем, электронные системы управления узлами и агрегатами мобильных машин».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка способов и методик синтеза цифровой системы управления подъемно-поворотным механизмом подвижного комплекса, позволяющих улучшить его точностные и динамические показатели качества.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать основные элементы гидроприводов, необходимые для построения цифровых электрогидравлических систем управления, и подъемные механизмы, применяемые в них. Провести анализ проблем, возникающих при разработке систем данного класса.

2. Разработать способ определения и методику компенсации влияния нелинейностей однозвенных рычажных механизмов гидроприводов на динамические показатели качества цифровых систем управления.

3. Разработать способ повышения точности работы цифровых систем управления подъемных механизмов при наличии неуравновешенной нагрузки.

4. Провести анализ топологий инверторов, используемых для управления двухфазным асинхронным двигателем, оценить качество формируемых ими напряжений и провести сравнительный анализ их гармонического состава при регулировании. Разработать аналитические выражения параметров ШИМ импульсов, позволяющие осуществить синтез напряжений, питающих обмотки асинхронного двигателя в цифровых системах управления.

5. Провести идентификацию объектов управления подъемно-поворотного механизма и разработать для них цифровые корректирующие устройства, позволяющие уменьшить величину перерегулирования по скорости.

6. Разработать имитационные модели подъемного и поворотного механизмов и провести проверку полученных результатов на опытном образце техники.

Научная новизна

1. Разработан способ определения нелинейностей однозвенных рычажных механизмов гидроприводов и предложена методика компенсации влияния переменного коэффициента преобразования, основанная на модуляции сигнала управления нормированным коэффициентом преобразования, которая позволяет улучшить динамические показатели качества подъемных механизмов.

2. Разработан способ определения и методика компенсации влияния неуравновешенной нагрузки на функционирование цифровой системы управления, отличающаяся отсутствием необходимости применения дополнительных датчиков и механических балансировочных устройств и позволяющая повысить точность работы системы.

3. Предложены выражения параметров ШИМ импульсов, основанные на аналитическом представлении процесса формирования результирующего напряжения, которые позволяют синтезировать напряжения, питающие обмотки

двухфазного асинхронного двигателя, оценить гармонический состав и провести сравнительный анализ напряжений при регулировании.

4. Разработаны цифровые регуляторы для астатических объектов управления четвертого и пятого порядков, полученные с применением метода переменного коэффициента усиления и позволяющие уменьшить величину перерегулирования по скорости и расширить применение данного метода на объекты управления до пятого порядка.

Положения, выносимые на защиту

1. Способ определения нелинейностей однозвенных рычажных механизмов гидроприводов и методика компенсации влияния переменного коэффициента преобразования, позволяющая улучшить динамические показатели качества подъемных механизмов.

2. Способ определения и методика компенсации влияния неуравновешенной нагрузки на функционирование цифровой системы управления, которая позволяет повысить точность работы системы.

3. Аналитические выражения параметров ШИМ импульсов, которые позволяют синтезировать напряжения, питающие обмотки двухфазного асинхронного двигателя, оценить гармонический состав и провести сравнительный анализ напряжений при регулировании.

4. Аналитические выражения коэффициентов передаточных функций цифровых регуляторов для астатических объектов управления четвертого и пятого порядков, позволяющие уменьшить величину перерегулирования по скорости и расширить применение данного метода на объекты управления до пятого порядка.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе основные теоретические и практические результаты получены соискателем самостоятельно и в полной мере отражены в опубликованных печатных работах. 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 6-й международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности (ИТ*2010)» (Минск, 2010); международной научной конференции «Информационные технологии и системы 2011, 2013 (ИТС 2011, 2013)» (Минск, 2011, 2013); 9, 10 и 11-й международных научно-технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2011, 2012, 2013); а также на 48-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Информационные технологии и управление» (Минск, 2012).

Опубликование результатов диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, включая 10 статей в рецензируемых научных журналах, 9 – в сборниках матери-

алов и тезисов международных и республиканских конференций. Получено 2 Евразийских патента. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 4,8 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, библиографического списка и девяти приложений. Общий объем диссертации 231 страница, из них 122 страницы основного текста. Диссертация содержит 109 рисунков, 7 таблиц, библиографический список из 150 источников на 13 страницах, включающий 21 публикацию автора, 9 приложений на 44 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

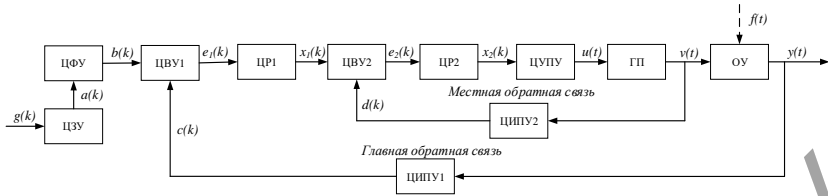
Во введении рассмотрена актуальность исследований, проведенных в данной диссертационной работе и направленных на совершенствование цифровых систем управления ППМ. Отмечено, что задача совершенствования систем управления ППМ связана с учетом нелинейностей приводных механизмов, определением и компенсацией влияния неуравновешенной нагрузки, синтезом напряжений, питающих обмотки асинхронного двигателя, и качественной оценкой их гармонического состава, идентификацией объектов управления, разработкой цифровых корректирующих устройств и с моделированием работы ППМ.

Большое значение в решении данных задач имеют работы таких известных авторов, как Артоболевский И. И., Гостев В. И., Заде Л. А., Солодовников В. В., Astrom K. J., Hagglund T., Левит В. Е., Новоселов Н. Н., Путилин Б. А., Lipo T. A., Holmes D. G., Мелешин В. И., Моин В. С., Нагорный В. С. и др.

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** осуществлен выбор структурной схемы исходной системы управления на базе гидропривода и преобразование ее в обобщенную цифровую электрогидравлическую систему управления, которая представлена на рисунке 1. Приведены основные достоинства и общие сведения о гидравлическом приводе. Рассмотрены роторные гидромашины, объемные гидроприводы и их основные элементы. Приведены примеры реализации объемных гидроприводов, с применением которых разработаны структурные схемы цифровых электрогидравлических систем управления конкретного применения для поворотного и подъемного механизмов ПК.

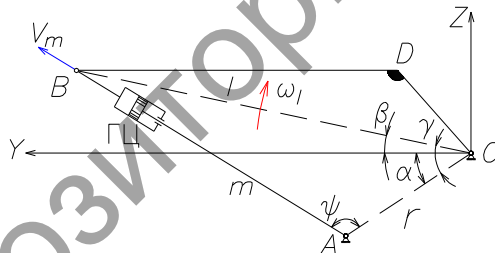
Рассмотрены особенности нелинейностей рычажных механизмов с возвратно-поступательным движением выходного звена. На рисунке 2 приведена схема механической передачи привода качающейся части (КЧ).



ЦЗУ – цифровое задающее устройство; ЦФУ – цифровое формирующее устройство; ЦВУ1, ЦВУ2 – цифровые вычитающие устройства; ЦР1, ЦР2 – цифровые регуляторы; ЦУПУ – цифровое усилительно-преобразовательное устройство; ЦИПУ1, ЦИПУ2 – цифровые измерительно-преобразовательные устройства; ГП – гидропривод; ОУ – объект управления

Рисунок 1. – Обобщенная структурная схема цифровой электрогидравлической системы управления

При линейном перемещении штока гидроцилиндра со скоростью $v_m = \dot{m}$ происходит нелинейное изменение угловой скорости поворота $\omega_l = \dot{\gamma}$ платформы BD . Следовательно, в процессе работы привода КЧ изменяется коэффициент преобразования K_p механической передачи, и эти изменения нужно определить и учитывать.



r – длина опорного расстояния AO ; m – длина оси AB ; l – длина опорного рычага BO ; α – угол AOY ; β – угол BOY ; γ – угол AOB ; $v_m = \dot{m}$ – скорость движения штока гидроцилиндра; $\omega_l = \dot{\gamma}$ – угловая скорость поворота оси BO

Рисунок 2. – Упрощенная схема механической передачи привода КЧ с малым опорным расстоянием

Коэффициент преобразования K_p механической передачи привода КЧ определен в виде

$$K_p = \frac{\omega_l}{v_m} = \frac{d\gamma}{dm} = \frac{180^\circ m}{\pi r l \sin(\alpha + \beta_0 + \varepsilon)}, \quad (1)$$

где $m = \sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos(\alpha + \beta_0 + \varepsilon)}$; $\varepsilon = \beta - \beta_0$; β_0 – начальный угол.

Предложено компенсировать влияние нелинейной зависимости изменения угловой скорости механических передач путем модуляции сигналов управления

исполнительным устройством нормированным коэффициентом преобразования. Определен нормированный коэффициент преобразования для конкретного образца техники в виде

$$K_n = \frac{K_{p, \varepsilon=30}}{K_p} = \frac{1,1353 \sin(44^\circ + \varepsilon)}{m}, \quad (2)$$

где $m = \sqrt{1,4527 - 0,9494 \cos(44^\circ + \varepsilon)}$.

Зависимость коэффициентов K_p и K_n от угла возвышения ε изображена на рисунке 3. Также в диссертационной работе рассмотрена механическая передача привода КЧ с большим опорным расстоянием. Аналитически доказано [4, 14], что величины нелинейностей механических передач КЧ для различных образцов техники достигают 13,97–16,17%.

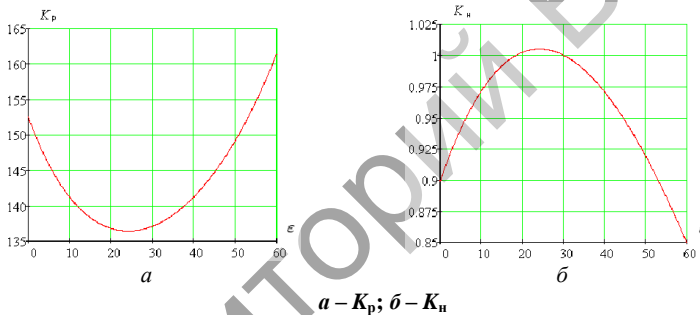


Рисунок 3. – Зависимость коэффициентов преобразования K_p и K_n от угла возвышения ε

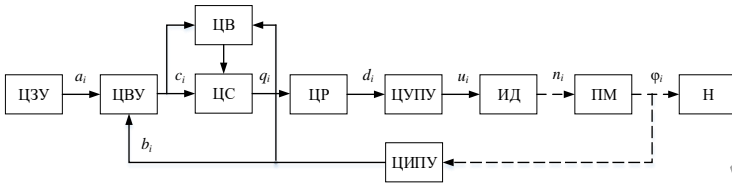
Предложен способ определения влияния неуравновешенной нагрузки на точность работы цифровой системы управления и методика компенсации этого влияния [20, 21], отличающаяся отсутствием дополнительных датчиков, механических балансировочных устройств и не требующая специального оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.

Методика компенсации влияния неуравновешенной нагрузки на работу ЦСУ предполагает изменение структурной схемы системы до вида, представленного на рисунке 4.

Предлагается вычислять управляющий сигнал по формулам:

$$q_1 = c_i + K_1 c_{i1}; \quad q_2 = c_i + K_2 c_{i2}, \quad (3)$$

где q_1, q_2 – управляющие сигналы, c_i – текущее значение ошибки, c_{i1}, c_{i2} – компенсационные сигналы, K_1, K_2 – поправочные коэффициенты.



ЦС – цифровой сумматор; ЦВ – цифровой вычислитель; ИД – исполнительный двигатель; ПМ – приводной механизм; Н – нагрузка

Рисунок 4. – Измененная структурная схема ЦСУ

Компенсационные сигналы c_{i1} и c_{i2} записываются уравнениями вида

$$c_{i1} = A_{1,1}\varphi_i^n + A_{1,2}\varphi_i^{n-1} + \dots + A_{1,n}\varphi_i + A_{1,m+1}; \quad (4)$$

$$c_{i2} = A_{2,1}\varphi_i^m + A_{2,2}\varphi_i^{m-1} + \dots + A_{2,m}\varphi_i + A_{2,m+1},$$

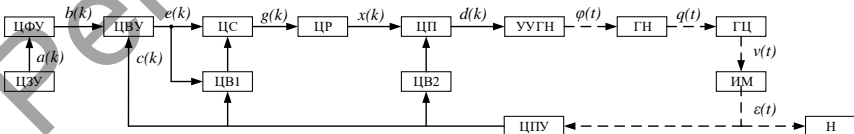
где $A_{1,1}, \dots, A_{1,n+1}; A_{2,1}, \dots, A_{2,m+1}$ – постоянные коэффициенты; n, m – показатели степени, причем $n > 1$ и $m > 1$.

Проведенная экспериментальная проверка компенсации влияния неуравновешенной нагрузки на точность работы ЦСУ на реальном образце техники показала уменьшение сигнала ошибки c_i системы более чем в 4 раза [17].

Рассмотрен алгоритм компенсации ошибки перехода, возникающей в ЦСУ при круговом слежении. С помощью имитационного моделирования проведена качественная оценка рассмотренного алгоритма компенсации ошибки перехода и подтверждена высокая устойчивость работы ЦСУ [9].

Разработана уточненная структурная схема цифровой электрогидравлической системы управления подъемного механизма ПМК, отличающаяся учетом переменного коэффициента преобразования рычажного механизма и влияния неуравновешенной нагрузки (рисунок 5).

Были обозначены задачи, рассматриваемые в последующих главах.



ЦП – цифровой перемножитель; УУГН – устройство управления гидронасосом;
ГН – гидронасос; ГЦ – гидроцилиндр; ИМ – исполнительный механизм;
ЦАПУ – цифровой преобразователь угла

Рисунок 5. – Уточненная структурная схема цифровой электрогидравлической системы управления подъемного механизма ПМК

Разработана уточненная структурная схема цифровой электрогидравлической системы управления поворотного механизма ПК с компенсацией ошибки перехода, возникающей при работе цифровой системы управления в режиме кругового слежения (рисунок 6).

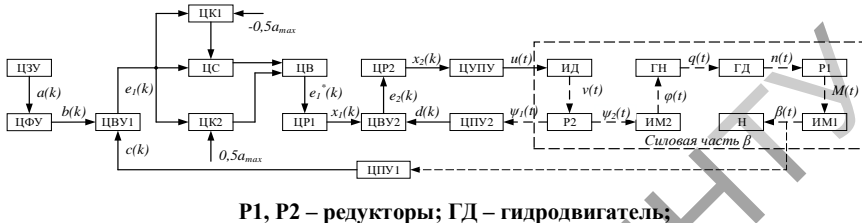


Рисунок 6. – Уточненная структурная схема цифровой электрогидравлической системы управления поворотного механизма ПК

Во **второй главе** диссертационной работы был проведен анализ применения ДАД при управлении производительностью гидронасосов в цифровых системах управления. Показано, что при управлении скоростью вращения ротора ДАД предпочтительным является применение двухфазных мостовых и трехфазных инверторов. Рассмотрены опорные модулирующие напряжения для данных типов инверторов при управлении ДАД [10].

Проанализированы критерии оценки гармонического состава ШИМ напряжений, питающих обмотки двигателя. Формируемые инверторами ШИМ напряжения содержат высшие гармоники, которые являются источниками дополнительных потерь. Для оценки гармонического состава ШИМ напряжений и приближения их к синусоидальной форме применяют коэффициент суммарных гармонических искажений THD. Однако при регулировании, когда индекс модуляции M стремится к нулю, коэффициент THD стремится к бесконечности, что приводит к неудобству использования данного коэффициента. Для решения этой проблемы был применен описанный в работах Holmes D. G. и Lipo T. A. взвешенный коэффициент суммарных гармонических искажений, нормированный к напряжению звена постоянного тока инвертора WTHD0, так как он инвариантен к изменению индекса модуляции

$$WTHD0 = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\frac{V_n}{V_{dc}} \right)^2}, \quad (5)$$

где V_n – амплитуда (действующее значение) напряжения n -й гармоники, В; V_{dc} – напряжение звена постоянного тока инвертора, В.

Исследованы напряжения, питающие обмотки двухфазного асинхронного двигателя. Для оценки качества формируемых напряжений использовались коэффициенты THD и WTHD0, рассчитанные по первым 60-ти гармоникам.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{59} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2}, \quad WTHD0 = WTHD \frac{V_1}{V_{dc}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{60} \frac{1}{n^2} \left(\frac{V_n}{V_{dc}}\right)^2}, \quad (6)$$

где V_1 – амплитуда (действующее значение) напряжения первой гармоники, В.

В результате анализа способов формирования ШИМ напряжений были выделены асимметричная регулярно-дискретизированная ШИМ с несущим напряжением треугольной формы, многократные ШИМ последовательности (созданные по ступенчатой, трапецеидальной и синусоидальной функциям построения ФП) и некоторые другие типы напряжений.

Для использования выражений (6) при анализе гармонического состава различных форм ШИМ напряжений и их микропроцессорной реализации были получены аналитические выражения параметров ШИМ импульсов α_i и τ_i , которые позволяют синтезировать рассмотренные последовательности ШИМ импульсов и определить амплитуды V_n^* напряжений n -й гармоники при регулировании [1, 5, 11, 13].

Коэффициент WTHD0 при регулировании многократных ШИМ последовательностей с 3-мя импульсами в полупериоде приведен на рисунке 7.

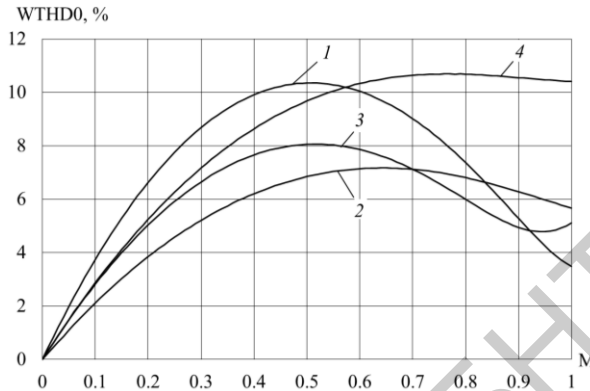
Малыми значениями коэффициента WTHD0 в широком диапазоне регулирования обладают многократные ШИМ последовательности, созданные по трапецеидальной и ступенчатой функциям построения (рисунок 7). Однако дальнейшее увеличение количества импульсов в полупериоде практически не влияет на значения коэффициента WTHD0 ШИМ напряжения, сформированного по трапецеидальной ФП, тогда как для остальных ШИМ напряжений значения коэффициента WTHD0 уменьшаются с увеличением количества импульсов.

Проведенный в диссертационной работе сравнительный и качественный анализ показал, что напряжение в виде последовательности ШИМ импульсов, созданных по ступенчатой функции построения с паузой на нулевом уровне обеспечивает улучшение показателей качества (уменьшение коэффициента WTHD0) на 29% при индексе модуляции $M = 0,5$.

Аналитические выражения параметров многократной ШИМ последовательности, созданной по ступенчатой ФП с паузой на нулевом уровне $Q_1 \neq 0$ имеют вид

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left[\frac{iT}{l+1} - \tau_i \right], \quad \tau_i = \frac{T}{2(l+1)} \sin \frac{i\pi}{l+1}, \quad (7)$$

где l – количество импульсов в полупериоде; α_i – фазовый угол i -го ШИМ импульса, отсчитанный от момента прохождения переменного синусоидального напряжения через нулевое значение до начала импульса, с; $i = 1, 2, 3, \dots, l$; τ_i – длительность i -го ШИМ импульса, с; T – период синусоидального напряжения, с.



1 – многократная неравномерная ШИМ; 2 – ШИМ по ступенчатой ФП;
3 – ШИМ по трапецидальной ФП; 4 – асимметричная ШИМ

Рисунок 7. – Коэффициент WTHD0 при регулировании $M = 0-1$

Получены выражения параметров ШИМ импульсов α_i и τ_i , основанные на аналитическом представлении процесса формирования результирующего напряжения, которые позволяют синтезировать рассмотренные последовательности ШИМ импульсов, определить амплитуды V_n^* напряжений n -й гармоники при регулировании, оценить гармонический состав различных форм напряжений с использованием коэффициентов THD и WTHD0 и провести сравнительный и качественный анализ.

В третьей главе рассмотрены современные подходы при создании математических моделей ОУ. Выбран алгоритм идентификации, в котором выделено четыре этапа определения математической модели ОУ. На этапе структурной идентификации ОУ поворотного и подъемного механизмов сделано предположение, что передаточные функции ОУ могут иметь четвертый или пятый порядок. В результате параметрической идентификации определена передаточная функция ОУ, описывающая линейную часть подъемного механизма:

$$G_{Пом}(s) = \frac{K}{s(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}, \quad (8)$$

где $K = 0,547 \text{ с}^{-1}$; $T_1 = 0,0667 \text{ с}$; $T_2 = 0,0633 \text{ с}$; $\xi_1 = 0,9$; $\xi_2 = 0,05$.

Для обеспечения высокого качества работы систем управления возникла необходимость разработки цифровых регуляторов. В качестве корректирующих устройств выбраны цифровые ПИД-регулятор, оптимальный по быстродействию регулятор и нечеткий регулятор.

Для проведения сравнительной оценки предложено использовать индекс производительности, содержащий оценки различных критериев качества ЦСУ:

$$PI = \frac{k}{C_1 m_p + C_2 t_p + C_3 t_s + C_4 e_{ss}}, \quad (9)$$

где m_p – величина перерегулирования, %; t_p – время первого максимума, с; t_s – время установления, с; e_{ss} – величина статической ошибки, град; C_1, C_2, C_3, C_4 – масштабирующие коэффициенты.

Численным методом переменного коэффициента усиления разработаны цифровые регуляторы для астатических объектов управления четвертого и пятого порядков, которые обеспечивают оптимальный по быстрдействию переходной процесс за минимальное число шагов квантования.

Передаточная функцию цифрового регулятора $W(z)$ для ОУ пятого порядка имеет вид

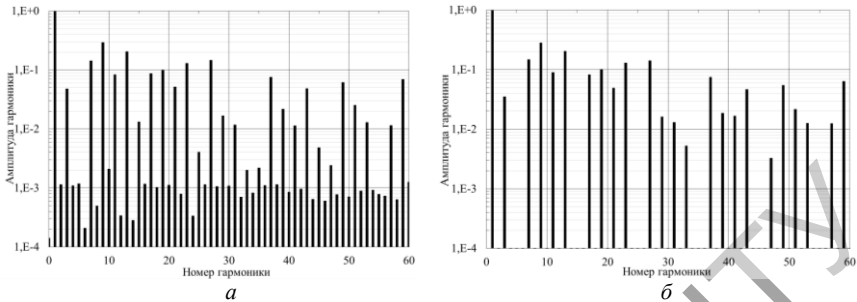
$$W(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}}. \quad (10)$$

Осуществлен выбор структуры и определен порядок настройки параметров нечеткого регулятора для подъемного и поворотного механизмов ПК.

Выбраны три входные лингвистические переменные (ошибка системы, скорость изменения ошибки и ускорение ошибки), которые характеризуются тремя терм-множествами (отрицательная, нулевая, положительная) и описываются функциями принадлежности треугольной формы. Для фаззификации используется «минимаксный» метод логического решения. Для дефаззификации используется метод определения «центра тяжести» результирующей функции принадлежности. Нечеткий вывод осуществляется по алгоритму Мамдани.

В **четвертой главе** проведено математическое моделирование и экспериментальные исследования элементов цифровых систем управления поворотного и подъемного механизмов подвижного комплекса.

Проведена экспериментальная проверка ШИМ напряжения, созданного по ступенчатой функции построения с паузой на нулевом уровне, и подтверждены амплитуды V_n^* напряжений n -х гармоник, полученные экспериментально и рассчитанные аналитически по формулам (рисунок 8). Коэффициенты ТНД, W_{THD0} , рассчитанные по формулам (7) 51,18%, 4,48% и полученные экспериментально 52,27%, 4,73% отличаются незначительно. Данные отличия связаны с появлением дополнительных гармоник, образование которых обусловлено наличием мертвой зоны, шумов измерения осциллографа и эффекта переключения ключевых элементов.



а – экспериментальный; *б* – теоретический

Рисунок 8. – Спектральный состав выходного напряжения построенного по ступенчатой ФП, содержащей паузу на нулевом уровне при индексе модуляции $M = 1$ и несущей частоте $f_n = 1,6$ кГц

Для исследования ЦСУ поворотного механизма ПК была составлена математическая модель. В основу модели положена уточненная структурная схема цифровой электрогидравлической системы управления поворотного механизма (см. рисунок 6).

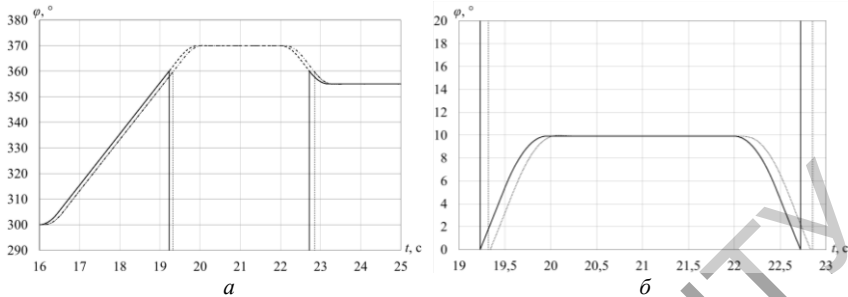
Осуществлено моделирование работы ЦСУ поворотного механизма, содержащей алгоритм компенсации ошибки перехода с однооборотным абсолютным энкодером. Графики, характеризующие поведение ЦСУ поворотного механизма при проходе через нулевое положение, изображены на рисунке 9. На графике использованы сокращения: ОД – однооборотный абсолютный энкодер, МД – многооборотный абсолютный энкодер.

Для исследования ЦСУ подъемного механизма ПК была составлена математическая модель с учетом переменного коэффициента преобразования.

При оценке качества работы модели ЦСУ подъемного механизма дополнительно учитывались колебания скорости гидроцилиндра. Для учета колебаний скорости при расчете индекса производительности в выражение (9) вместо времени первого максимума t_p была введена оценка перерегулирования по скорости $m_v = (V_{\max} - V_y) / V_y$ и получено

$$PI = \frac{k}{C_1 m_p + C_2 t_s + C_3 e_{ss} + C_4 m_v}, \quad (11)$$

где m_v – перерегулирование по скорости, %; V_y – установившееся значение скорости, °/с; V_{\max} – максимальное значение скорости, °/с.



- a*** – проход через нулевое положение; ***б*** – участок перехода
 (—) – сигнал задания для ОД; (·····) – отработка ЦСУ с ОД;
 (- - - -) – сигнал задания для МД; (- · - ·) – отработка ЦСУ с МД

Рисунок 9. – График отработки ЦСУ поворотного механизма с алгоритмом компенсации ошибки перехода

Осуществлена проверка работы модели ЦСУ подъемного механизма, содержащей различные типы цифровых регуляторов. Лучшее качество работы достигается при использовании разработанного оптимального цифрового регулятора (ОЦР), который обеспечивает переходной процесс без перерегулирования в линейной зоне. Однако при выходе из линейной зоны возникают колебания скорости. Уменьшение колебаний скорости достигается применением ОЦР комбинированной структуры (рисунок 10).

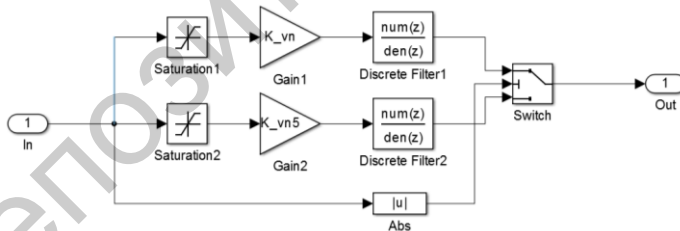


Рисунок 10. – Схема блока ОЦР комбинированной структуры

Точка переключения регуляторов комбинированной структуры выбирается в процессе оптимизации осуществляемой по индексу производительности (11) (рисунок 11).

Проведен сравнительный анализ работы регуляторов, который показал, что ОЦР комбинированной структуры обеспечивает лучший переходной процесс по скорости и по положению, а также подавляет колебания скорости гидроцилиндра с величиной остаточных колебаний, не превышающей 1,5% для положительного выброса и 2,28% для отрицательного выброса. Максимальные

отклонения скорости от установившегося значения (рисунок 12) для ПИД-регулятора составляют 43% для положительного выброса и 37,3% для отрицательного выброса и для нечеткого регулятора 3% для положительного выброса и 23,8% для отрицательного выброса.

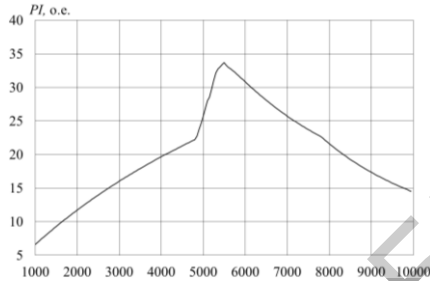
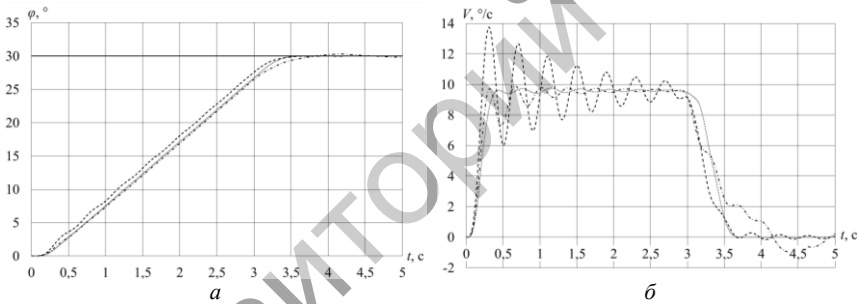


Рисунок 11. – Индекс производительности при вариации точки переключения



а – график положения; б – график скорости

(—) – сигнал задания; (.....) – ОЦР комбинированной структуры;

(- - - -) – ПИД-регулятор; (- · - · -) – нечеткий регулятор

Рисунок 12. – Графики отработки сигнала задания 30° ЦСУ подъемного механизма различными регуляторами

Показано, что введение компенсации переменного коэффициента преобразования приводит к существенному уменьшению перерегулирования и времени установления ЦСУ, а в случае применения ОЦР обеспечивается переходной процесс без перерегулирования. Так при использовании нечеткого регулятора перерегулирование в системе уменьшается на 16,3% и составляет 32,7%, ПИД-регулятора – на 7,5% и составляет 2,5%, ОЦР комбинированной структуры – на 6,5% и составляет 0% (при наличии компенсации перерегулирование полностью отсутствует). Время установления уменьшается для нечеткого регулятора с 10 с до 3,28 с, для ПИД-регулятора – с 0,97 с до 0,74 с, для оптимального ЦР – с 0,93 с до 0,67 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны цифровые электрогидравлические системы управления для подъемного и поворотного механизмов ПК. Установлено, что при работе электро- и гидроприводов подъемных механизмов, которые содержат рычажные механизмы, и линейном движении поршня гидроцилиндра происходит нелинейное изменение угла возвышения ε и, следовательно, коэффициента преобразования K_p механической передачи с величиной нелинейности, достигающей 13,97–16,17%. Для стабилизации коэффициента K_p и исключения влияния его нелинейной зависимости на работу привода предложено с помощью нормированного коэффициента преобразования K_n осуществить модуляцию сигналов управления исполнительными двигателями. При этом величина перегулирования при работе подъемного механизма подвижного комплекса уменьшилась в 1,5–4 раза, а в случае применения оптимального ЦР комбинированной структуры – получен апериодический переходной процесс без перегулирования [4, 8, 14, 19].

2. Разработан способ определения влияний неуравновешенной нагрузки на работу подъемных механизмов и методика компенсации этих влияний, позволяющая повысить точность работы системы без применения дополнительных датчиков и механических балансировочных устройств. Проведена экспериментальная проверка предложенной методики на реальном образце техники, которая подтвердила ее высокую эффективность и уменьшение диапазона изменений ошибки цифровой системы управления более чем в 4 раза [7, 17, 20, 21].

3. На основе проведенного сравнительного и качественного анализа различных типов инверторов и форм напряжений, питающих обмотки ДАД, установлено, что напряжение в виде последовательности ШИМ импульсов, созданных по ступенчатой функции построения с паузой на нулевом уровне, обеспечивает улучшение показателей качества (уменьшение коэффициента $WTND0$) на 29% при индексе модуляции $M = 0,5$ [1, 5, 10, 11, 13].

4. На основе проведенного анализа современных подходов при создании математических моделей объектов управления осуществлена структурная идентификация объекта управления поворотного и подъемного механизмов. Для полученных передаточных функций четвертого и пятого порядков разработаны оптимальные цифровые регуляторы. Для ОУ четвертого порядка расчет произведен численным методом переменного коэффициента усиления, а для ОУ пятого порядка – численным методом переменного коэффициента усиления с применением оптимальных управляющих воздействий. Получены аналитические выражения, которые позволяют определить коэффициенты передаточных функций цифровых регуляторов через параметры ОУ и период квантования h [2, 3, 6, 8, 15, 16, 18, 19].

5. Составлены имитационные модели цифровых систем управления поворотного и подъемного механизмов и их отдельных блоков. В результате сравнительного анализа регуляторов установлено, что оптимальный цифровой регулятор комбинированной структуры обеспечивает лучший переходной про-

цесс по скорости и по положению, а также уменьшение колебаний скорости гидроцилиндра в 1,9 раза для положительного выброса. Введение компенсации переменного коэффициента преобразования позволило уменьшить величину перегулирования в 1,5-4 раза, а в случае применения оптимального цифрового регулятора – обеспечить апериодический переходной процесс без перегулирования [4, 8, 9, 14, 21].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Эффективность результатов исследований подтверждена при выполнении опытно конструкторских работ ОКР и решении различных производственных задач.

Алгоритмы и программы для системы управления электрогидравлическим силовым следящим приводом подъемно-поворотного механизма внедрены на предприятии НПООО «ОКБ ТСП» в рамках НИОКТР «Модернизация и капитальный ремонт зенитного ракетного комплекса «Бук» (9К37)» № ГР 20043083 от 14.09.2004, выполняемая по поручению президента Республики Беларусь от 02.03.2004 г. Разработанные алгоритмы апробированы на опытно-конструкторском образце подъемно-поворотного механизма и внедрены на НПООО «ОКБ ТСП» в серийно выпускаемой продукции.

Алгоритмы и программы для системы управления следящим приводом, внедрены на предприятии ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей» в рамках проекта «АДУНОК». Разработанные алгоритмы апробированы на опытно-конструкторском образце и внедрены на ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей» в серийно выпускаемой продукции (изделие «АДУНОК»).

Разработанные алгоритмы могут также использоваться в системах управления другими подъемно-поворотными механизмами, содержащими различной сложности рычажные механизмы, неуравновешенную нагрузку или однооборотные абсолютные энкодеры. Разработанные оптимальные ЦР комбинированной структуры позволяют в системе управления с обратной связью по положению обеспечить подавление колебаний скорости для ОУ четвертого или пятого порядков.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Стрижнев, А.Г. Спектральный анализ напряжений, питающих электродвигатель переменного тока / А.Г. Стрижнев, Ю.Н. Петренко, Г.В. Ледник // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 5. – С. 25–30.
2. Стрижнев, А.Г. Настройка цифровых регуляторов в канале регулирования потокосцепления ротора в системе векторного управления / А.Г. Стрижнев, А.В. Марков, Г.В. Ледник // Доклады БГУИР. – 2011. – № 1. – С. 5–11.

3. Стрижнев, А.Г. Применение цифровых регуляторов в канале регулирования потокосцепления ротора в системе векторного управления / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Информатика. – 2011. – № 2 (30). – С. 124–133.

4. Стрижнев, А.Г. Нелинейности простейших рычажных механизмов гидродвигов / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Вестник военной академии Республики Беларусь. – 2011. – № 3 (32). – С. 128–132.

5. Стрижнев, А.Г. Синтез напряжений многократных равномерных ШИМ, созданных по ступенчатым функциям построения / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 5. – С. 24–30.

6. Стрижнев, А.Г. Синтез оптимального цифрового регулятора для системы с объектом управления четвертого порядка / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Информатика. – 2013. – № 4. – С. 66–73.

7. 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.

8. 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. – С. 59–67.

9. Стрижнев, А.Г. 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.

10. Ледник, Г.В. Особенности питания обмоток двухфазного асинхронного двигателя от трехфазного инвертора с мостовым выпрямителем / Г.В. Ледник // Новости науки и технологий. – 2015. – № 3 (43). – С. 53–59.

Статьи в сборниках материалов конференций и тезисов докладов

11. Стрижнев, А.Г. Создание напряжения многократной равномерной ШИМ для питания электродвигателя переменного тока / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Информационные технологии в промышленности (ИТ*2010): тезисы докладов Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 окт. 2010 г. / ОИПИ НАН Беларуси; науч. ред.: Е.В. Владимиров. – Минск, 2010. – С. 160–161.

12. Стрижнев, А.Г. Определение входных параметров электродвигателя переменного тока / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, май 2011 г. В 4 т. / Белорус. национ. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 238–239.

13. Стрижнев, А.Г. Синтез напряжений многократных равномерных ШИМ, созданных по трапецеидальной и синусоидальной функциям построения / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, май 2011 г. В 4 т. / Белорус. национ. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 239–240.

14. Стрижнев, А.Г. Нелинейности простейших рычажных механизмов гидрориводов и их компенсация / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Информационные технологии и системы 2011 (ИТС 2011): материалы междунар. науч. конф., Минск, 26 окт. 2011 г. / БГУИР; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2011. – С. 90-91.

15. Стрижнев, А.Г. Автоматизированный синтез цифровых регуляторов в среде MATLAB / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, май 2012 г. В 4 т. / Беларус. национ. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 293.

16. 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 науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 7–11 мая 2012 г. / БГУИР; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2012. – С. 87.

17. 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 Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, май 2013 г. В 4 т. / Беларус. национ. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 212.

18. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора для объекта управления четвертого порядка / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013): материалы междунар. науч. конф., Минск, 23 окт. 2013 г. / БГУИР; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2013. – С. 96–97.

19. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора для объекта управления пятого порядка с использованием оптимальных управляющих воздействий / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович, Г.В. Ледник // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013): материалы междунар. науч. конф., Минск, 23 окт. 2013 г. / БГУИР; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2013. – С. 98–99.

Патенты

20. Способ и цифровая следящая система для определения и компенсации влияний неуравновешенности нагрузки на работу следящих систем и приводов: Евразийский пат. 016669, G 05 В 11/00, G 05 В 19/406 / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов, С.Л. Ботеновский, И.А. Гончарук, С.М. Виноградов, Г.В. Кирячок; заявитель ООО «Техносоюзпроект» (ВУ); заявл. 07.10.2010; выдан 29.06.2012 // ЕАПВ бюл. / Евразийское патентное ведомство. – 2012. – № 6. – С. 372.

21. Цифровая следящая система: Евразийский пат. 016668, G 05 В 11/00, G 05 В 19/406 / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов, С.Л. Ботеновский, И.А. Гончарук, С.М. Виноградов, Г.В. Кирячок; заявитель ООО «Техносоюзпроект» (ВУ); заявл. 07.10.2010; выдан 29.06.2012 // ЕАПВ бюл. / Евразийское патентное ведомство. – 2012. – № 6. – С. 371–372.



РЭЗІЮМЭ

Леднік Генадзь Васільевіч

**Паляпшэнне якасных характарыстык
лічбавай сістэмы кіравання электрагідраўлічным
пад'ёмна-паваротным механізмам**

Ключавыя словы: пад'ёмна-паваротны механізм; ступеністая функцыя пабудовы; нелінейнасці рычажных механізмаў; гідрапрывад; нармаваны каэфіцыент пераўтварэння; аб'ект кіравання; лічбавыя рэгулятары; невыразная логіка; кампенсацыя ўплыву неўраўнаважанай нагрузкі; кампенсацыя памылкі пераходу; пераходныя працэсы.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка спосабаў і метадык сінтэзу лічбавай сістэмы кіравання пад'ёмна-паваротным механізмам рухомага комплексу, якія дазваляюць палепшыць іх паказчыкі якасці па дакладнасці і дынаміцы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Распрацаваны спосаб вызначэння нелінейных адназвенных рычажных механізмаў гідрапрывадаў і прапанавана метадыка кампенсацыі ўплыву пераменнага каэфіцыента пераўтварэння, заснаваная на мадуляцыі сігналу кіравання нарміраваным каэфіцыентам пераўтварэння, якая дазваляе палепшыць дынамічныя паказчыкі якасці пад'ёмных механізмаў.

Распрацаваны спосаб вызначэння і метадыка кампенсацыі ўплыву неўраўнаважанай нагрузкі на функцыянаванне лічбавай сістэмы кіравання, якая адрозніваецца адсутнасцю неабходнасці прымянення дадатковых датчыкаў і механічных балансавальных прылад і дазваляе павысіць дакладнасць працы сістэмы.

Прапанаваны выразы параметраў ШІМ імпульсаў, заснаваныя на аналітычным прадстаўленні працэсу фарміравання выніковага напружання, якія дазваляюць сінтэзаваць напружанні для сілкавання абмотак двухфазнага асінхроннага рухавіка, ацаніць гарманічны склад і правесці параўнальны аналіз напружанняў пры рэгуляванні.

Распрацаваны лічбавыя рэгулятары для аб'ектаў кіравання чацвёртага і пятага парадкаў, атрыманыя з прымяненнем метаду пераменнага каэфіцыента ўзмацнення, якія дазваляюць паменшыць велічыню перарэгулявання па хуткасці і пашырыць прымяненне дадзенага метаду на аб'екты кіравання да пятага парадку.

Рэкамендацыі па выкарыстанню: сістэмы кіравання пад'ёмна-паваротнымі механізмамі, якія змяшчаюць рычажныя механізмы і неўраўнаважаную нагрузку.

Галіна выкарыстання: краны, робататэхнічныя комплексы, пускавыя ўстаноўкі.

РЕЗЮМЕ

Ледник Геннадий Васильевич

Улучшение качественных характеристик цифровой системы управления электрогидравлическим подъемно-поворотных механизмов

Ключевые слова: подъемно-поворотный механизм; ступенчатая функция построения; нелинейности рычажных механизмов; гидропривод; нормированный коэффициент преобразования; объект управления; цифровые регуляторы; нечеткая логика; компенсация влияния неуравновешенной нагрузки; компенсация ошибки перехода; переходные процессы.

Целью работы является разработка способов и методик синтеза цифровой системы управления подъемно-поворотным механизмом подвижного комплекса, позволяющих улучшить их точностные и динамические показатели качества.

Полученные результаты и их новизна: Разработан способ определения нелинейностей однозвенных рычажных механизмов гидроприводов и предложена методика компенсации влияния переменного коэффициента преобразования, основанная на модуляции сигнала управления нормированным коэффициентом преобразования, которая позволяет улучшить динамические показатели качества подъемных механизмов.

Разработан способ определения и методика компенсации влияния неуравновешенной нагрузки на функционирование цифровой системы управления, отличающаяся отсутствием необходимости применения дополнительных датчиков и механических балансировочных устройств и позволяющая повысить точность работы системы.

Предложены выражения параметров ШИМ импульсов, основанные на аналитическом представлении процесса формирования результирующего напряжения, которые позволяют синтезировать напряжения, питающие обмотки двухфазного асинхронного двигателя, оценить гармонический состав и провести сравнительный анализ напряжений при регулировании.

Разработаны цифровые регуляторы для астатических объектов управления четвертого и пятого порядков, полученные с применением метода переменного коэффициента усиления и позволяющие уменьшить величину перерегулирования по скорости и расширить применение данного метода на объекты управления до пятого порядка.

Рекомендации по использованию: системы управления подъемно-поворотными механизмами, содержащими рычажные механизмы и неуравновешенную нагрузку.

Область применения: краны, робототехнические комплексы, пусковые установки.

SUMMARY

Lednik Henadz Vasilievich

**Improvement of qualitative characteristics
of digital control system
of electrohydraulic lifting-turning mechanisms**

Keywords: lifting-turning mechanism; staircase functions; nonlinearity linkages; hydraulic drive; normalized conversion factor; plant; discrete controllers; fuzzy logic; unbalanced load compensation; tracking transition error compensation; transients.

The aim is to develop synthesis techniques and methods for digital control system of lifting and turning mechanism of mobile system to improve their accuracy and dynamic performance indices.

The results obtained and their novelty: A method for determining and compensation of unbalanced load effect on digital control system was developed. The method does not need any additional sensors and mechanical balancing devices and allows to increase the system accuracy.

A method for determining the nonlinearities of single-link lever mechanisms of hydraulic drives was developed. A method for compensation of variable conversion coefficient effect based on the modulation of the control signal by a normalized conversion coefficient was proposed, which improves the dynamic performance of lift mechanisms.

Expressions of the PWM pulse parameters based on the analytical representation of the process of forming the resulting voltage were proposed. These expressions allow to synthesize the voltages for a two-phase asynchronous motor supply, evaluate the harmonic composition, and perform a comparative analysis of the voltages during regulation.

Digital controllers for astatic control objects of the fourth and fifth orders were developed using a method of variable gain. These controllers allow reducing the overshoot rate and extending the application of this method to control objects up to the fifth order.

Recommendations for use: control systems for lifting-turning mechanisms, containing lever mechanisms and unbalanced load.

Field of application: cranes, robotic complexes, launchers.

Научное издание

ЛЕДНИК

Геннадий Васильевич

**УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПОДЪЕМНО-ПОВОРОТНЫМ
МЕХАНИЗМОМ**

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 22.02.2018. Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,05. Тираж 60. Заказ 187.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.