

На правах рукописи



**Модзелевский Дмитрий Евгеньевич**

**ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новокузнецк 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой АЭП и ПЭ ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» **Островляничик Виктор Юрьевич**

**Официальные оппоненты:** **Симаков Геннадий Михайлович**, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок

**Кочетков Владимир Петрович**, доктор технических наук, профессор Хакасского технического института – филиала ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», действительный член МАН ВШ, профессор кафедры электроэнергетики

**Ведущая организация:** Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» ГОУ ВПО «ТУСУР» (НИИ АЭМ ТУСУР)

Защита состоится «20» ноября 2014 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: siyu.eva@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан «\_\_» сентября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.102.01 к.т.н., доцент



И.Ю. Семькина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Шахтные подъемные установки являются основным транспортным средством для перевозки людей и грузов по вертикальным и наклонным шахтам. От их производительности и надежности зависит эффективность всего предприятия по добыче полезных ископаемых.

Исследования систем управления шахтными подъемными установками проводились такими авторами, как В.Е. Католиков, А.Д. Динкель, А.М. Седунин, В.Ю. Островляничик, И.Я. Гальперин, В.Р. Бежок, О.В. Слежановский, А.В. Башарин, В.А. Бесекерский, G.K. Gudvin, R. Dorf, но были ограничены возможностями используемых в то время технических элементов систем управления. На нынешнем этапе развития микропроцессорной техники многие ограничения, накладываемые техническими средствами управления, сняты.

Тиристорный преобразователь электрической энергии является основным звеном в системах электропривода. От его параметров и быстродействия зависят выходные характеристики и качество управления системой электропривода в целом.

Задачи создания преобразователей и систем импульсно-фазового управления (СИФУ) в составе электропривода рассматривались на протяжении многих лет. Наиболее активно они изучались такими авторами, как В.М. Перельмутер, В.М. Терехов, В.А. Барский, О.А. Маевский, В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко, Ю.К. Розанов. Для тиристорных электроприводов с отдельным управлением до конца не решенным остался ряд вопросов, связанных с управлением в режиме прерывистых токов и осуществлением безлюфтового переключения групп тиристоров при работе на ЭДС двигателя и индуктивной нагрузке большой мощности.

Применение быстродействующих микропроцессорных устройств для управления преобразователями позволяет реализовать гибкие алгоритмы формирования импульсов в соответствии с заданной фазой или законом управления, обеспечивающих надежную работу при изменении параметров питающей сети и электромагнитных процессов, протекающих в нагрузке, а также производить учет особенностей управления и нелинейностей в самом преобразователе.

В электроприводах большой мощности и специальных системах управления возникают процессы в тиристорном преобразователе (ТП) при работе на индуктивную нагрузку, которые не могут быть объяснены стандартными представлениями о ТП. При больших индуктивностях тиристорный преобразователь не удовлетворяет условиям управляемости при регулировании координат электропривода.

Для таких систем необходимо разработать эффективные законы управления, которые могут быть реализованы в микропроцессорных системах импульсно-фазового управления.

Исходя из изложенного, вопросы реализации современных цифровых систем автоматического управления тиристорным электроприводом шахтных подъемных установок являются актуальными.

**Объект исследования** – управляющие устройства электроприводом шахтной подъемной установки: тиристорный преобразователь, система автоматического регулирования скорости, задающее управляющее устройство, система управления тиристорным электроприводом шахтной подъемной установки.

**Цель диссертационной работы** – разработать структуры и алгоритмы цифровых управляющих устройств тиристорного электропривода шахтной подъемной установки с учетом уточненного математического описания тиристорного электропривода, что позволит повысить надёжность системы и увеличить производительность подъёмной установки.

#### **Задачи**

1. Провести анализ электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе. Построить модель ТП, учитывающую его нелинейные динамические свойства.

2. Разработать функциональную структуру и математическую модель системы управления тиристорным преобразователем и на её основе построить алгоритмическую структуру ТП, обеспечивающую линейность характеристик ТП в широком диапазоне изменения параметров нагрузки.

3. Выбрать и обосновать структуру системы автоматического управления скоростью подъемного двигателя. Сформулировать и решить задачу синтеза регуляторов в полученной структуре.

4. Разработать комплекс программ для исследования моделей, анализа переходных процессов, проверки адекватности модели, идентификации параметров объекта управления.

5. Разработать методику проектирования и настройки подобных микропроцессорных систем управления.

6. Произвести апробацию разработанных структур и алгоритмов на шахтных подъемных установках.

#### **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель тиристорного преобразователя, отличающаяся учетом нелинейных динамических свойств тиристорных при подаче и снятии управляющих импульсов в зоне малых токов.

2. Впервые определена зависимость между шириной управляющего импульса, углом управления и временем затягивания переходного процесса при пуске и реверсе тиристорного преобразователя в зоне малых токов.

3. Получены алгоритмы управляющего устройства тиристорного преобразователя, отличающиеся управлением шириной управляющего импульса в функции тока преобразователя, возможностью работы тиристорного преобразователя при различных нагрузках и обеспечивающие сокращение времени переключения групп преобразователя.

4. Предложена структура системы автоматического регулирования скорости с датчиком ЭДС, отличающаяся использованием упрощенной модели двигателя по управлению в датчике ЭДС двигателя и обеспечивающая требуемые показатели качества и робастности.

5. Создана методика синтеза управляющего устройства, отличающаяся оптимизацией переходных процессов одновременно по нескольким параметрам с применением многомерных методов оптимизации.

6. Разработана методика реализации цифровой системы управления, отличающаяся формализованным переходом от структуры модели к её графу, затем к дереву модели, с последующим получением вычислительного алгоритма и кода программы.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработанная методика настройки цифровых систем управления электроприводом шахтными подъемными установками, отличающаяся итерационным подходом и использованием методов оптимизации, позволила сократить время внедрения и отладки систем управления до трех дней включая монтажные работы и минимизировала количество тестовых пусков оборудования.

2. Предложенное устройство управления тиристорным электроприводом обеспечивает линейность характеристик преобразователя при различных видах нагрузок. Это устраняет задержку при реверсе тока преобразователя и возникающие при этом перенапряжения, при сохранении энергетических показателей тиристоров.

3. Практически реализовано цифровое устройство автоматического управления электроприводом подъемной машины ЦУАЭПМ. 9 версий устройства внедрены на производстве, 4 версии выполнены в виде лабораторных стендов. Каждая версия устройства создана на общих принципах, изложенных в диссертации, со своей уникальной структурой системы управления и решаемыми задачами. В целом это привело к увеличению производительности подъемных установок за счет уменьшения времени цикла и обеспечения безотказной работы оборудования.

4. Создан комплекс программ для управления электроприводом и моделирования, который использован для проведения исследований тиристорного преобразователя и системы автоматического регулирования.

**Методы исследования.** Теория электропривода, теория автоматического управления, теория электрических цепей, методы оптимизации, численное моделирование, натурный эксперимент. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования осуществлялись с использованием комплекса программ, разработанных автором в средах Watcom и Builder на языках C и C++.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Исследование нелинейных процессов в тиристорном преобразователе в зоне малых токов возможно осуществить путем применения модели преобразователя, учитывающей нелинейные динамические свойства тиристора.

2. Достичь линейности характеристик ТП при индуктивной нагрузке возможно путем определения функциональной взаимосвязи между шириной управляющего импульса, углом управления и временем затягивания переходного процесса при пуске и реверсе ТП.

3. Качество и робастность управления скоростью шахтной подъемной установки могут быть обеспечены применением двухконтурной системы автоматического регулирования с внутренним контуром напряжения, внешним контуром ЭДС.

4. Использование графов при получении вычислительного алгоритма и кода программы и оптимизации переходных процессов одновременно по нескольким параметрам с применением многомерных методов оптимизации позволяет создать унифицированное цифровое устройство управления электроприводом шахтной подъемной установки.

**Достоверность полученных результатов.** Обоснованность и достоверность научных выводов и результатов подтверждаются правомочностью принятых исходных положений и допущений, адекватностью используемых математических моделей, количественным и качественным соответствием теоретических и экспериментальных данных, апробацией моделей и алгоритмов на реальных объектах.

**Результаты работы** используются на предприятии ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» при создании устройств ЦУАЭПМ для реализации систем автоматического управления, внедрены алгоритмы диагностики систем управления тиристорным преобразователем с применением модели наблюдателя, а также в учебном процессе Сибирского государственного индустриального университета при подготовке бакалавров и магистров.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались в рамках следующих конференций: II Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной областях» (Новокузнецк, 18 – 20 мая 2004 г.), XI Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 29 марта – 5 апреля 2005 г.), V Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 12 – 14 апреля 2005 г.), XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томск, 27 марта – 31 марта 2006 г.), XIII Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 26 – 30 марта 2007 г.), IV и V Всероссийских научно-практических конференциях «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» (Новокузнецк, 2010 г. и 2012 г.). Разработанные системы автоматического управления неоднократно экспонировались на выставке «Уголь России и Майнинг» и были отмечены двумя золотыми медалями (2011 г., 2009 г.). Полученные результаты используются в учебном процессе кафедры автоматизированного электропривода и промышленной электроники СибГИУ.

Выполненное исследование позволило создать алгоритмы управления тиристорным преобразователем и практически реализовать тиристорный преобразователь, работающий как на индуктивную нагрузку большой мощности, так и при работе на ЭДС двигателя. Разработанные системы управления тиристорными преобразователями внедрены на трех шахтных подъемных установках: с системой ТП-Д (с реверсом поля двигателя мощностью 2250 кВт); с асинхронным двигателем с фазным ротором; с системой Г-Д мощностью 2000 кВт. Системы внедрены в качестве возбудителя синхронных двигателей 2500 кВт и в качестве системы динамического торможения. В системах электропривода обеспечена линейность характеристик тиристорного преобразователя и достигнуто требуемое качество управления.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 29 работах, в том числе 2-х статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и получено два свидетельства (№ 2013617014 и № 2013617015) о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, выводов, списка литературы. Работа изложена на 155 страницах, иллюстрирована 5 таблицами и 66 рисунками. Библиографический указатель включает 108 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи научной работы, методы исследования, научная новизна, практическая значимость, предмет защиты и личный вклад автора, апробация и структура диссертации.

**В первой главе** проведен анализ систем управления электроприводами шахтных подъемных установок, рассмотрены известные подходы к исследованию тиристорных преобразователей и электропривода в целом.

На основании анализа современных структур электропривода выделены основные управляющие объекты для исследования: преобразователь электрической энергии, в состав которого входит тиристорный преобразователь, питающий обмотку возбуждения генератора, и система автоматического регулирования скорости.

При исследовании выявлено, что при значительной индуктивной нагрузке тиристорного преобразователя использование известных моделей приводит к значительным погрешностям.

Исходя из описанных этапов движения подъемной установки, делается вывод, что электропривод работает в двух основных режимах: режиме программного движения при разгоне и торможении и режиме стабилизации при движении на установившейся скорости.

Приводится обзор методов и структур построения систем управления, а также способов представления автоматических систем.

В качестве объекта управления, содержащего большую индуктивность, в задачах электропривода шахтных подъемных установок рассматриваются двигатель постоянного тока (ДПТ) при регулировании потока возбуждения или тока якоря и электропривод системы Г-Д.

Характер нагрузки тиристорного преобразователя непосредственно влияет на его внутренние электромагнитные процессы. Существующие модели с достаточной степенью точности описывают процессы преобразования для активной нагрузки и нагрузки, содержащей ЭДС. Тип нагрузки определяет законы управления и структуру тиристорного преобразователя. Исследования показали, что при активно-индуктивной нагрузке со значительной индуктивностью использование известных моделей тиристорных преобразователей приводит к ошибочным результатам.

Показано, что для электропривода шахтной подъемной установки целесообразно применять двухконтурную систему регулирования скорости с внутренним контуром напряжения и внешним контуром ЭДС. Системы подчиненного регулирования, построенные таким образом, оказываются наиболее перспективными с точки зрения возможности реализации и обеспечения точности несмотря на необходимость организации внешнего контура токоограничения. Для таких систем выходит на первый план вопрос реализации датчика ЭДС, от точности выделения которой зависит качество управления, устойчивость к изменению параметров электропривода.

Рассмотрены особенности построения цифровых систем управления. При этом, на основе сравнения метода структурной декомпозиции, метода z-преобразования и  $\delta$ -преобразования, сделан вывод о возможности использования линейных методов анализа и синтеза систем управления при достаточно малом шаге дискретизации.

Если принять, что время дискретизации достаточно мало, то можно полагать, что данная дискретная система при анализе и синтезе эквивалентна непрерывной с достаточной степенью приближения. Степень приближения зависит от времени дискретизации и выбранного метода. Сделан вывод, что не требуется рассмотрение громоздких z-преобразований и других преобразований, если шаг дискретизации достаточно мал. Можно пользоваться упрощенными методами дискретизации, такими как метод структурной декомпозиции.

Система управления должна обслуживать в реальном времени сразу несколько внешних устройств. Причем периоды повторения алгоритмов вычисления в реальном

времени для каждого из устройств различаются. В таких системах на первый план выходят алгоритмы диспетчеризации вычислительного процесса и модульный подход к построению программ.

На основе анализа сделаны следующие выводы:

1. При применении преобразователей электрической энергии с большими индуктивными сопротивлениями необходимо учитывать нелинейные динамические свойства тиристорных преобразователей при работе в составе электропривода.
2. Остался не решенным вопрос синтеза регулятора ЭДС в двухконтурной системе регулирования скорости электропривода шахтной подъемной установки.
3. При достаточно малом шаге дискретизации в цифровых системах управления электроприводом шахтной подъемной установки возможно пользоваться непрерывными методами анализа и синтеза систем управления.
4. Вопросы разработки алгоритмов функционирования цифровых систем управления при параллельном выполнении различных задач становятся актуальными. Необходимо разработать алгоритмы и структуры систем управления шахтными подъемными установками.

**Во второй главе** рассмотрены алгоритмические структуры управляющих объектов тиристорного электропривода шахтной подъемной установки: тиристорного преобразователя, системы автоматического регулирования скорости и задающего управляющего устройства.

На основе анализа электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе при активно-индуктивной нагрузке получен закон изменения тока от времени, определяющего режим работы тиристорного преобразователя; произведен анализ процесса включения тиристорного преобразователя при работе на обмотку возбуждения; определено время нарастания тока в тиристорном преобразователе для широкого диапазона постоянных времени нагрузки и углов управления  $\alpha$ ; произведена классификация подъемных электрических машин по управляемости при открывании ТП в зависимости от номинального момента электрической машины; предложен алгоритм прогнозирующего управления ТП для ускорения процесса его открывания и реверсирования; в результате предложена и обоснована структура системы автоматического регулирования скорости электропривода, а также показаны недостатки классических способов синтеза систем с последовательной коррекцией.

Структура полученной модели тиристорного преобразователя представлена как совокупность трех блоков: нагрузки, состояния тиристоров  $S$  и состояния нелинейного элемента  $R_V$ , описываемого системой уравнений:

$$R_V = \begin{cases} R_3, & \text{если } i_V \leq 0 \text{ или } U_V < 0, \\ R_3, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } S = 0 \text{ и } i_y = 0 \text{ и } i_V \leq U_V / R_3, \\ R_0, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } i_V > I_{y0} \text{ и } S = 1, \\ R_6, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } S = 0 \text{ и } i_y = I_{y.c}, \\ R(t_{om}) = K_1 t_{om}, & \text{если } i_y = 0 \text{ и } (U_V / R_3 < i_V < I_6) \text{ и } S = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i_V$  – ток в тиристоре;

$U_V$  – напряжение на выводах анод-катод тиристора;

$I_{y0}$  – ток удержания включенного состояния тиристора;

$I_6$  – ток перехода во включенное состояние;



$i_y$  – ток управления;

$I_{y.c}$  – ток управления равный току спрямления характеристики тиристора;

$R_3$  – сопротивление тиристора в закрытом состоянии;

$R_o$  – сопротивление тиристора в открытом состоянии;

$R_6$  – сопротивление тиристора в момент включения при поданном управляющем импульсе;

$R(t_{om})$  – нелинейная функция, введенная в модель работы тиристора для описания нелинейных динамических свойств;

$K_I$  – коэффициент пропорциональности, получаемый при настройке модели тиристора;

$t_{om}$  – время, отсчитываемое от момента снятия управляющего импульса;

$S$  – внутреннее состояние тиристора (0 – закрыт, 1 – открыт) – может быть представлено выражением:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } U_V < 0 \text{ или } i_V < I_{y0}, \\ 1, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } i_V \geq I_6, \\ S & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки адекватности модели результаты аналитических расчетов сравнивались с результатами соответствующего эксперимента, в котором при подаче импульсов разной продолжительности на тиристор фиксировались напряжение и ток. Результат с наименьшим отклонением модельного и экспериментального токов соответствует выражениям (1), (2).

Разработана компьютерная модель, результаты моделирования которой приведены на рисунке 1.

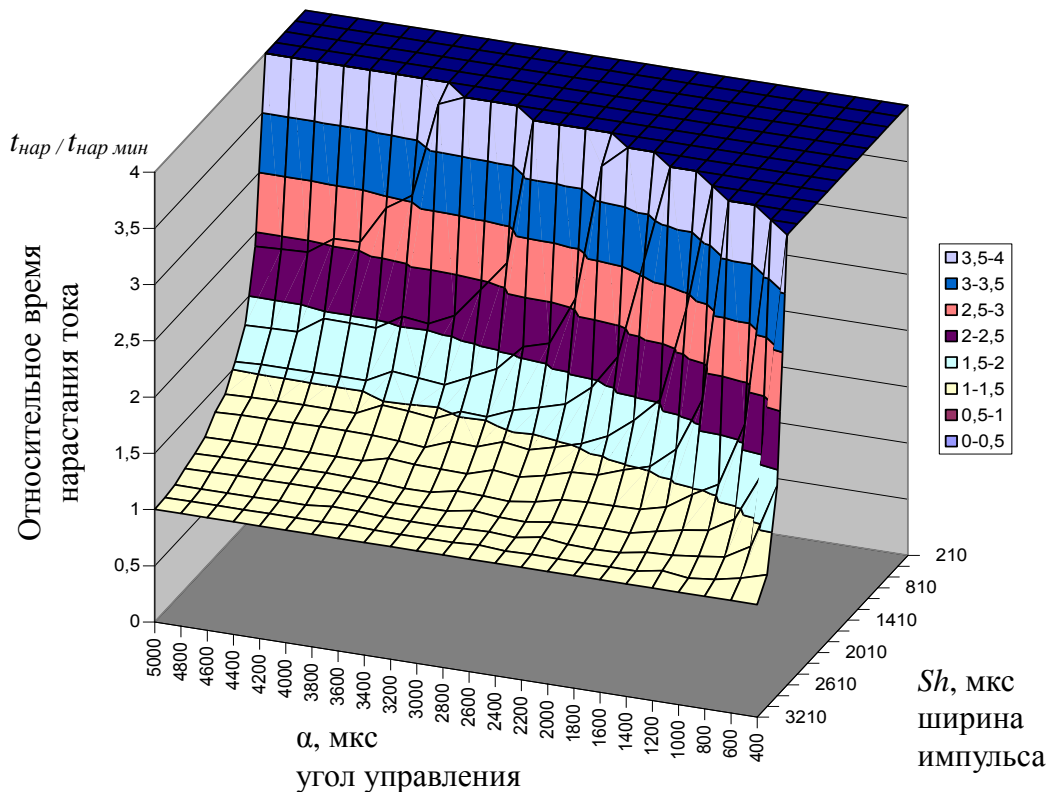


Рисунок 1 – График зависимости относительного затягивания времени реверса в функции ширины импульса  $Sh$  и угла управления  $\alpha$

В проведенном компьютерном эксперименте определялась длительность нарастания тока в тиристорном преобразователе до тока включения тиристора и выход из зоны нелинейности для широкого диапазона постоянных времени нагрузки, углов управления  $\alpha$ , различной ширины и скважности управляющего импульса. Представленная на рисунке 1 диаграмма показывает, что при уменьшении ширины управляющего импульса характеристики вырождаются от подобия регулировочной характеристике (при 3300 мкс) до существенного затягивания переходного процесса вплоть до невозможности открыть тиристорный преобразователь при любом угле управления (при 610 мкс).

На основании результатов исследования получена зависимость ширины импульса  $Sh$ , обеспечивающая затягивание переходного процесса не более чем при ширине импульса при максимальном угле  $Sh_{max}$ , в функции угла управления  $\alpha$ :

$$Sh = Sh_{max} \sin \alpha. \quad (3)$$

Относительное время нарастания не зависит от постоянной времени нагрузки. Как видно из формулы (3), определяющей величиной является максимальная ширина управляющего импульса  $Sh_{max}$ , которая определяется при максимальном угле управления преобразователем. Эту величину возможно определить экспериментально, увеличивая ширину управляющего импульса при полностью открытом преобразователе. Величина  $Sh_{max}$  зависит от коэффициента форсировки преобразователя и от тока удержания тиристора.

Максимальная ширина управляющего импульса прямо пропорционально зависит от величины постоянной времени нагрузки  $T_{ов}$  в исследуемом диапазоне:

$$Sh_{max} = K \cdot T_{ов}, \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности.

На рисунке 2 представлена алгоритмическая структура системы автоматического регулирования (САР). САР с обратной связью по ЭДС отличаются от известных САР наличием узла измерения ЭДС.

Рассмотрено применение методики на примере синтеза контура ЭДС. Методика синтеза предложена в следующем виде:

1. Строится математическая модель системы автоматического регулирования. Определяются структура системы автоматического регулирования и параметры объекта управления.
2. Определяется желаемый вид переходной характеристики как эталонной функции. Оптимизация может производиться по нескольким переходным характеристикам разных переменных состояния.
3. Строится целевая функция, в которой влияние различных переменных учитывается весовыми коэффициентами. Наиболее удобно строить целевую функцию на основе интегральной квадратичной оценки.
4. Задаются пределы изменения искомым параметров системы управления.
5. Выбирается начальная точка внутри заданной области.
6. Получается вычислительная модель системы. Строится переходный процесс. Вычисляется значение целевой функции.
7. Проверяется условие завершения процедуры оптимизации с помощью выбранного критерия точности (например,  $\Delta x < \delta$ , где  $x$  – значение синтезируемого параметра,  $\delta$  – значение требуемой точности). В случае выполнения условия перейти к пункту 9. При невыполнении условия перейти к пункту 8.
8. В соответствии с выбранным методом оптимизации определяются новые значения искомым параметров, и производится переход к пункту 6.

9. Проводится сравнение заданного и полученного переходного процесса с целью контроля удовлетворения полученных характеристик заданным условиям. В случае неудовлетворительных результатов – возврат и пересмотр пунктов с 5 по 1.

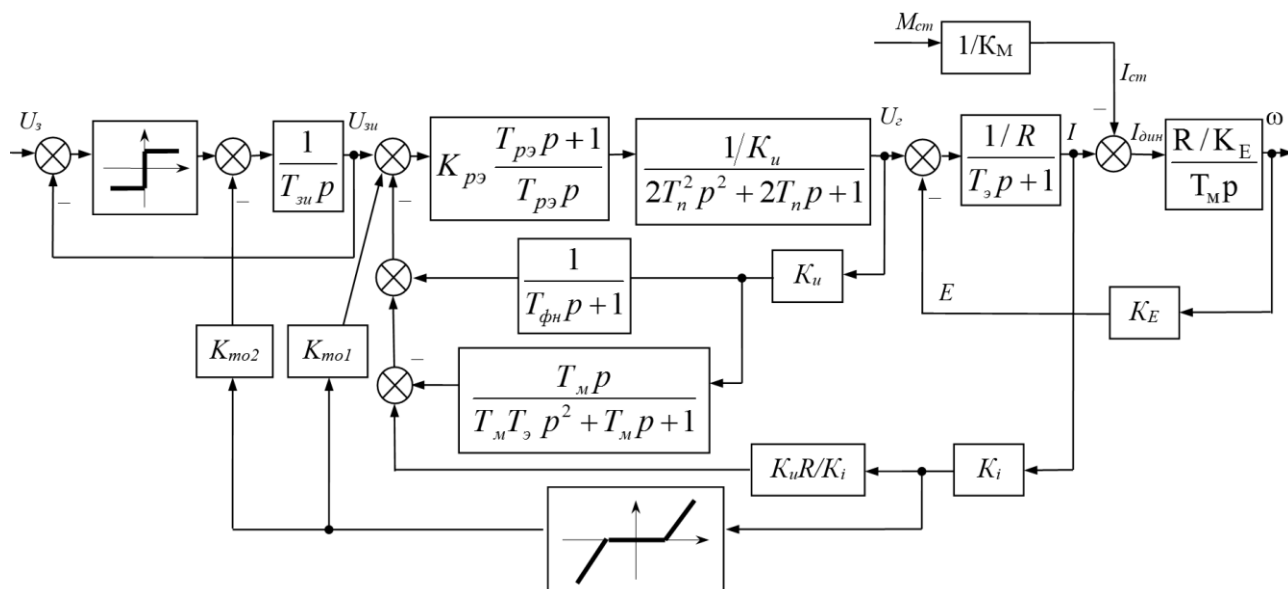


Рисунок 2 – Структура системы автоматического регулирования скорости с токоограничением

$U_3$  – задание на скорость,  $U_{zu}$  – выход задатчика интенсивности,  $U_2$  – напряжение генератора,  $M_{cm}$  – статический момент,  $I_{cm}$  – статический ток,  $I$  – ток якорной цепи,  $I_{дин}$  – динамический ток,  $\omega$  – скорость,  $E$  – ЭДС двигателя,  $T_{zu}$  – постоянная времени задатчика интенсивности,  $K_{pэ}$  – коэффициент усиления регулятора ЭДС,  $T_{pэ}$  – постоянная времени регулятора ЭДС,  $K_u$  – коэффициент обратной связи по напряжению,  $T_n$  – постоянная времени преобразователя,  $K_M$  – коэффициент связи момента и тока двигателя,  $R$  – сопротивление якорной цепи,  $T_э$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи,  $K_E$  – коэффициент связи скорости и ЭДС двигателя,  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени электропривода,  $K_i$  – коэффициент обратной связи по току,  $T_{фн}$  – постоянная времени фильтра, эквивалентного упрощенной модели двигателя по управляющему воздействию,  $K_{mo1}$  – коэффициент токоограничения в регуляторе ЭДС,  $K_{mo2}$  – коэффициент токоограничения в задатчике интенсивности

Целевую функцию выберем как среднеквадратичное отклонение исследуемого  $I$  тока от эталонного  $I_{эталон}$ . Для ограничения перерегулирования использован метод штрафных функций. При условии превышения исследуемым током на 5% величины эталонного тока разность ошибки увеличивается в 100 раз, тем самым практически устанавливается барьер на превышение током 5% зоны. Тогда выражение для целевой функции  $F_i$  будет иметь вид

$$F_i = \int_a^b \left( (I - I_{эталон}) + 100(I - I_{эталон})(I > 1,05I_{эталон}) \right)^2 dt, \quad (5)$$

где  $a, b$  – границы интервала, в котором производится анализ.

В дискретном времени в цифровой модели целевая функция  $F_{id}$  представляется выражением

$$F_{id} = dt \sum_{i=0}^{(b-a)/dt} \left( (I - I_{эталон}) + 100(I - I_{эталон})(I > 1,05I_{эталон}) \right)^2, \quad (6)$$

где  $dt$  – интервал дискретизации модели.

На рисунке 3 приведен переходный процесс пуска в режиме пуска при токоограничении. Как видно из графика, настройка с использованием предложенной методики позволила ограничить величину тока. Значение тока не отклоняется от заданного при токоограничении.

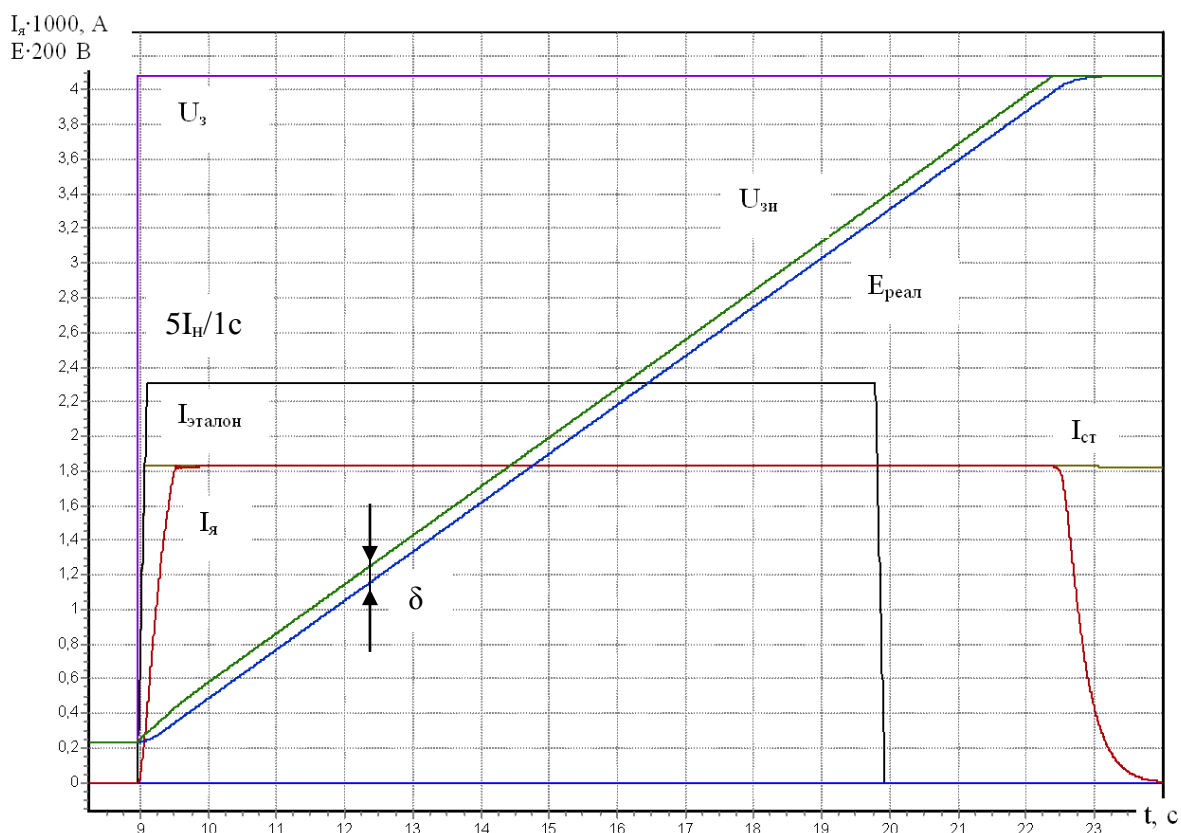


Рисунок 3 – Переходный процесс в системе с токоограничением

$U_3$  – задание на систему,  $U_{зи}$  – выход датчика интенсивности,  $E_{реал}$  – величина ЭДС двигателя,  $I_{эталон}$  – эталонный ток для целевой функции,  $5I_n/1с$  – производная по току для эталонной функции в номиналах тока двигателя,  $I_{ст}$  – заданное значение уровня токоограничения,  $I_я$  – ток якоря двигателя,  $\delta$  – динамическая ошибка по ЭДС

В результате исследований сделаны следующие выводы:

Установлена зависимость времени затягивания переходного процесса включения тиристорного преобразователя на индуктивную нагрузку от ширины импульса, постоянной времени цепи нагрузки и угла управления. Полученная зависимость дает возможность получить алгоритм управления тиристорным преобразователем, обеспечивающий сокращение влияния зоны малых токов на работу преобразователя при сохранении теплового режима тиристоров.

Структура системы регулирования скорости с использованием датчика ЭДС и регулятора ЭДС является наиболее предпочтительной для электроприводов данного класса, по сравнению с трехконтурной системой подчиненного регулирования.

Предложенная структура системы автоматического управления позволяет получить требуемое качество переходных процессов в скорости, при этом сохраняет устойчивость при изменениях параметров объекта управления и обладает низкой чувствительностью к шумам измеряемых сигналов.

Применение предложенного способа реализации токоограничения в задающем устройстве позволяет получить значение максимального тока без колебаний и перерегулирования.

В третьей главе рассмотрены структуры и алгоритмы цифровой системы управления (ЦСУ), построена обобщенная математическая модель основных звеньев ЦСУ, составлена функциональная структура системы импульсно-фазового управления (СИФУ), созданы алгоритмы модулей и системы управления в целом, получена методика синтеза ЦСУ.

При использовании метода структурно-топологического представления после оптимизации вычислительный алгоритм апериодического звена, выбранного в качестве примера, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} z_i = (x_i - y_{i-1}) \cdot \Delta t_n + z_{i-1}; \\ y_i = z_i \gg 12, \end{cases} \quad (7)$$

где  $x$ ,  $y$  и  $z$  – входная, выходная и внутренняя переменные;

$\Delta t_n$  – шаг дискретизации, масштабированный с учетом постоянной времени звена;

$i$  – текущий шаг вычисления.

На основании данного подхода произведена реализация вычислительных алгоритмов всех цифровых звеньев системы.

Применительно к тиристорному электроприводу произведено следующее распределение задач по уменьшению требований к частоте выполнения алгоритма (частоте дискретизации каждой отдельной задачи):

- 1 - формирование управляющих импульсов – самая часто выполняющая задача, от частоты выполнения которой зависит точность подачи управляющих сигналов;
- 2 - синхронизация с питающей сетью;
- 3 - опрос сигналов состояния моста; вычисление датчика состояния моста; логическое переключающее устройство;
- 4 - форсировка и управления шириной импульса, формирователь задания СИФУ;
- 5 - расчет внутреннего контура системы автоматического управления;
- 6 - расчеты внешних контуров и дополнительных связей системы регулирования;
- 7 - технологические переключения, дискретные сигналы состояния, формирование задания на скорость;
- 8 - сервисные функции, настройка, обработка команд пользователя.

Алгоритм управляющей программы для системы электропривода обладает задачами с различным приоритетом и быстродействием и строится на основе распределения временного ресурса между задачами. Фактически имеем систему с жесткими временными ограничениями. Предложенный алгоритм обеспечивает диспетчеризацию выполняемых задач путем разбиения их на отдельные операции.

Преобразование структурных схем и алгоритмических структур в вычислительные алгоритмы требует большого количества операций и преобразований. Формализация подобного преобразования возможна с применением теории графов. Алгоритмические структуры цифровой системы управления могут быть построены из простейших блоков на основе метода структурно-топологической декомпозиции.

Разработана методика реализации цифровой системы управления, обеспечивающая переход от структуры модели к вычислительному алгоритму. Методика реализации цифровой системы управления по графу модели заключается в составлении графа модели по структурной схеме, расчетного дерева модели и затем вычислительного алгоритма. Процесс перехода от модели к графу, а затем к дереву модели представлен рисунком 4. Вычислительный алгоритм получается при обходе дерева модели.

Использование предложенной методики позволяет получить алгоритмы работы отдельных модулей системы. В результате объединения модулей в единый алгоритм и, распределив ресурсы системы, был составлен алгоритм управляющей программы.

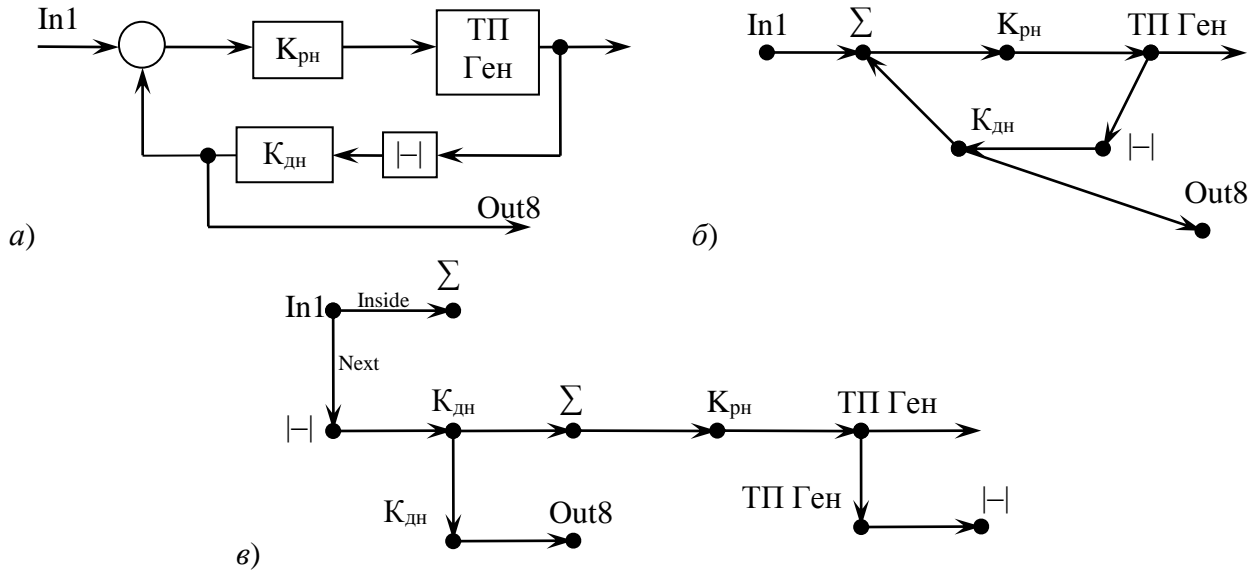


Рисунок 4 – Модель контура напряжения (а), граф модели (б) и дерево модели (в)

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы проектирования систем электропривода шахтной подъемной установки, представлены технические решения, принятые при реализации тиристорного электропривода.

На рисунке 5 представлена полученная техническая структура цифрового устройства автоматического управления электроприводом шахтной подъемной установки (ЦУАЭПМ). Она является универсальной и может применяться на различных объектах управления.

В соответствии с разработанными алгоритмами создан комплекс программ, который применен для исследования полученной математической модели, а также для решения задач управления электроприводом.

Структура программного комплекса состоит из двух аппаратно распределенных частей: управляющая программа, выполняемая в контроллере, и среда визуализации и моделирования. Применение модульной структуры обеспечивает автономность частей программного комплекса. Комплекс программ позволяет решать следующие задачи:

- контроль внутренних переменных, рассчитываемых в управляющей программе на основании входных данных;
- проверка и отладка управляющей программы с использованием модели процесса управления;
- автоматизированная идентификация параметров объекта управления;
- параметрическая и структурная оптимизация системы управления на основании модели объекта управления и заданного эталона;
- построение и исследование конкретных математических моделей.

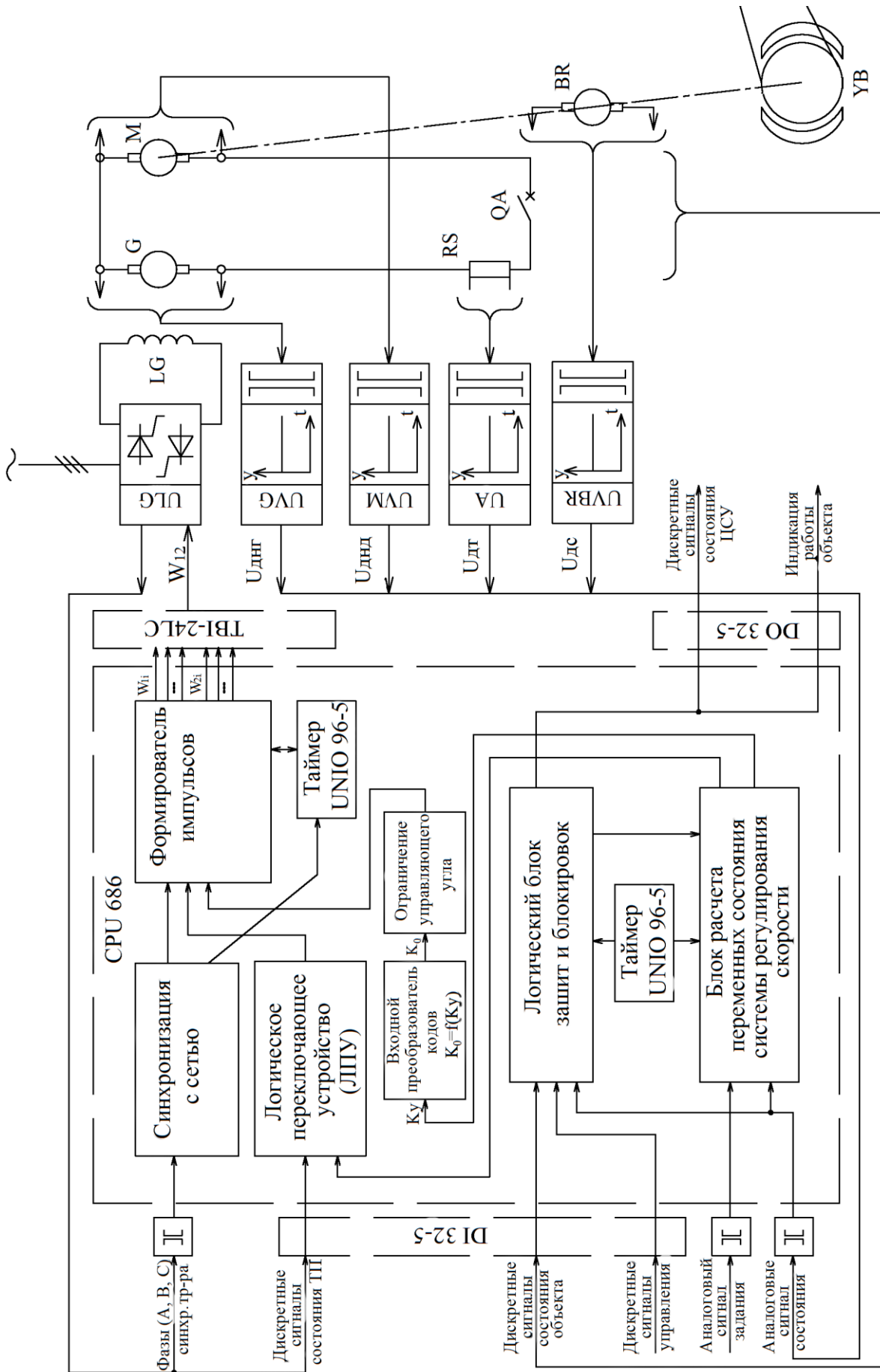


Рисунок 5 – Техническая структура ЦУАЭПМ

С использованием программного комплекса составлена методика разработки и модернизации систем управления:

1. Аналитический анализ известных решений в подобной области.
2. Идентификация структуры и параметров электропривода основана на методах оптимизации, обеспечении адекватности математической модели и методах автоматического определения параметров.
3. Применение методов структурной и параметрической оптимизации для синтеза системы управления.
4. Исследование адекватности полученной модели по новым данным, не участвовавшим в настройке модели и идентификации.
5. Испытания разработанной и проверенной системы управления на реальном объекте.
6. Анализ качества управления, основанный на режимной проверке и отладке, и автоматическое определение отклонений. В результате взаимодействия частей программного комплекса имеется возможность фиксировать и отображать результаты испытаний в виде осциллограмм и производить их последующий анализ.

Среда моделирования в дальнейшем может быть использована в качестве средства для создания самонастраивающихся систем управления. Предложенная во второй главе методика синтеза управляющего устройства, отличающаяся оптимизацией переходных процессов одновременно по нескольким параметрам с применением многомерных методов оптимизации, реализуется в разработанной среде, входящей в состав комплекса программ.

Методика проектирования и модернизации систем управления имеет эффект при внедрении цифровых управляющих устройств, заключающийся в сокращении времени внедрения и возможности оптимизации настроечных параметров системы.

Устройства, созданные на базе представленных в настоящей работе выводов, на четырех действующих шахтных подъемных установках. Переходные процессы, полученные в результате внедрения устройств ЦУАЭПМ на промышленных объектах, удовлетворяют заявленным требованиям качества управления.

**В заключении** подводятся итоги, сформулированы основные научные результаты работы, даны рекомендации по их применению, отмечена новизна и практическая значимость, указаны направления дальнейшей работы.

**В приложении** приведены акты внедрения результатов работы в производство и в учебный процесс, разрешение и сертификат на применение устройства ЦУАЭПМ, а также награды различных выставок «Уголь России и Майнинг».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель тиристорного преобразователя, учитывающая нелинейные динамические свойства тиристора в зоне малых токов. Полученные зависимости позволили разработать алгоритмы управления тиристорным преобразователем. Предложенные алгоритмы управляющего устройства отличаются использованием модели тиристорного преобразователя и обеспечивающие сокращение времени реверса.

2. На основании полученных результатов получены алгоритмы работы системы импульсно-фазового управления, линеаризующие характеристику тиристорного преобразователя при различных параметрах нагрузок в зоне малых токов за счет управления шириной управляющего импульса и исключают аварийные ситуации,



связанные со значительными перенапряжениями. Линеаризация статических и динамических характеристик позволяет оптимизировать работу ТП в замкнутых системах управления и энергетические показатели ТП.

3. Проведен синтез системы автоматического регулирования скорости шахтной подъемной установкой, которая выполнена в виде двухконтурной системы с внутренним контуром напряжения, внешним контуром ЭДС и с дополнительной нелинейной обратной связью по току для организации токоограничения. В режиме токоограничения перерегулирование в токе составляет менее 1 %.

4. Структура системы управления отличается использованием упрощенной модели двигателя по управлению в канале обратной связи по напряжению в контуре ЭДС и обеспечивающая требуемые показатели качества и робастности. Синтезированная САР обеспечивает ограничение перерегулирования в токе на уровне 5 % и производной по току на уровне  $5 I_n$  в секунду, что сокращает динамические механические нагрузки и износ механического оборудования.

5. Предложена методика построения и проектирования систем управления на основе функционально-структурной декомпозиции. Предложенная методика синтеза сокращает время настройки системы при оптимизации параметров системы управления сразу по нескольким координатам.

6. Создан комплекс программ для управления и исследования электропривода, объединяющий средства управления и моделирования; комплекс программ выполняет задачи управления и настройки систем, а также моделирования процессов в электроприводе.

7. Усовершенствованная методика разработки и модернизации систем электропривода, отличающаяся циклическим подходом и использованием методов оптимизации позволила сократить время внедрения систем управления в производство до трех дней, включая монтаж оборудования.

8. На разработанную систему управления получен сертификат соответствия и разрешение на применение на опасных производственных объектах.

9. Разработаны и внедрены на подъёмных установках Абаканского филиала ОАО «Евразруда» и ОАО «Тыретский солерудник» системы автоматического управления. Они позволили повысить производительность на 3 - 5 % и уменьшить простои из-за отказов в системе управления.

10. Внедрение разработанного устройства на подъемной установке ЦР6х3,2/0,75 позволило уменьшить время подъема в среднем на 6 секунд и увеличить производительность установки по сырой руде на 98,2 тыс. тонн в год с экономическим эффектом около 335,8 млн. рублей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Модзелевский Д.Е. Математическое моделирование тиристорного преобразователя с учетом нелинейности тиристора / Д.Е. Модзелевский, В.Ю. Островляничик // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2011. – №6 (88). – С. 72-75.

2. Модзелевский Д.Е. Моделирование электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе с учетом нелинейных динамических свойств тиристора / Д.Е. Модзелевский, В.Ю. Островляничик // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2(51). – С. 188-193.

### ***Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ***

3. Программа устройства автоматического управления электроприводом подъемной машины: свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013617014 / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский; правообладатель ООО «НИИ АЭМ СибГИУ». – №2013614615, заявл. 04.06.2013, зарегистр. 30.07.2013.

4. Программа анализа переходных процессов и моделирования электропривода шахтной подъемной установки: свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013617015 / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский; правообладатель ООО «НИИ АЭМ СибГИУ». – №2013614618, заявл. 04.06.2013, зарегистр. 30.07.2013.

### ***Прочие публикации по теме исследования***

5. Модзелевский Д.Е. Анализ электромагнитных процессов работы тиристора. Построение эмпирической математической модели работы тиристора, объясняющей характер работы тиристора в зоне малых токов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всерос. научной конф. студентов, аспирантов, молодых ученых. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – Вып.13. – Ч.4. Технические науки. – 459 с. – С. 433-437.

6. Модзелевский Д.Е. Алгоритмизация процессов управления в электроприводе ШПУ // Современная техника и технологии: Труды X юбилейной Международной научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: ТПУ, 2004. Т.1 – С. 262.

7. Модзелевский Д.Е. Анализ процесса включения тиристорного преобразователя при работе на индуктивную нагрузку большой мощности // Современная техника и технологии: Труды XV Международной научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2009. – Т. 1. – 613 с. – С. 447-448.

8. Модзелевский Д.Е. Комплектный тиристорный электропривод с микропроцессорным управлением (КТЭ МП) // Современная техника и технологии: Труды XII Международной научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: ТПУ, 2006. – Т.1 – С. 297.

9. Модзелевский Д.Е. Методика автоматизированного поиска параметров объекта управления с помощью системы моделирования // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всерос. научной конф. студентов, аспирантов, молодых ученых. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – Вып. 12. – Ч. 5. Технические науки. – 292 с. – С. 51-55.

10. Модзелевский Д.Е. Опыт реализации специальной технологической защиты на шахтной подъемной установке ОАО «Тыретский солерудник» // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всерос. научной конф. студентов, аспирантов, молодых ученых. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – Вып. 14. – Ч. 4. Технические науки. – 472 с. – С. 430-433.

11. Модзелевский Д.Е. Принципы построения микропроцессорных систем импульсно-фазового управления // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всерос. научной конф. студентов, аспирантов, молодых ученых. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – Вып. 12. – Ч. 5. Технические науки. – 292 с. – С. 43-46.

12. Модзелевский Д.Е. Разработка систем управления преобразователями электрической энергии шахтных подъемных установок // Тезисы IX Международной

научно-технической конф. молодых специалистов. – Новокузнецк: Полиграфист, 2011. – 112 с. Дополнение к тезисам 36 с. – С. 25-26.

13. Модзелевский Д.Е. Комплекс программ для исследования и управления электроприводом // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды четвертой Всерос. научно-практ. конф., посвященной 80-летию СибГИУ. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – С. 175-182.

14. Осипов Е.П. Оптимизация режимов работы главных приводов систем верхней загрузки доменной печи / Е.П. Осипов, В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды V Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 261-264.

15. Островлянчик В.Ю. Обобщенная модель тиристорного преобразователя в составе системы автоматического регулирования / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды V Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – С. 260-267.

16. Островлянчик В.Ю. Алгоритмизация процессов управления в электроприводе ШПУ / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды IV Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2003. – С. 297-302.

17. Островлянчик В.Ю. Исследование электромагнитных процессов в цифровом возбудителе системы Г-Д для электроприводов мощностью свыше 1000 кВт. / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2009: Труды VII Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 415-418.

18. Островлянчик В.Ю. Методика разработки программного обеспечения систем логического управления технологических защит современного электропривода / В.Ю. Островлянчик, В.А. Кубарев, Д.Е. Модзелевский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды II Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – С. 112-116.

19. Островлянчик В.Ю. Разработка и исследование цифровой системы управления комплектным тиристорным электроприводом / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды VI Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 415-418.

20. Островлянчик В.Ю. Современный автоматизированный электропривод промышленных установок / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский, В.А. Кубарев, А.В. Дужий // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды IV Всерос. научно-практ. конф., посвященной 80-летию СибГИУ. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – С. 94-106.

21. Островлянчик В.Ю. Применение метода корневого годографа при синтезе параметров системы автоматического регулирования скорости электроприводов горно-металлургической отрасли / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: Труды XVII Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2013. – 414 с. – С. 373-378.

22. Островлянчик В.Ю. Комплектный тиристорный электропривод с микропроцессорным управлением (КТЭ МП) / В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды V Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 86-90.

23. Островляничик В.Ю. Микропроцессорный комплектный тиристорный электропривод / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды III Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 169-176.

24. Островляничик В.Ю. Принципы построения алгоритмических структур систем логического управления современного электропривода / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды II Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – С. 116-121.

25. Островляничик В.Ю. Самонастраивающиеся системы управления полупроводниковыми преобразователями / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский // Металлургия: новые технологии, управление, инновации, качество: Труды Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – 466 с. – С. 255-257.

26. Островляничик В.Ю. Цифровая система импульсно-фазового управления / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды III Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 165-169.

27. Островляничик В.Ю. Цифровое логическое переключающее устройство в системе импульсно-фазового управления / В.Ю. Островляничик, Д.Е. Модзелевский, А.М. Ершов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды III Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 176-181.

28. Темников А.В. Исследование эффективности использования ФКУ в электроснабжении Тыретьского солерудника / А.В. Темников, Д.Е. Модзелевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2009: Труды VII Всерос. научно-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 415-418.

29. Modzelevskij D.E. Complete thyristoral electrical drive with micro processing control // Modern Techniques and Technologie (MTT'2006): The twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2006 – С.71-73.

**Личный вклад автора** в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1, 2, 15, 17, 21, 25] – разработка компьютерных моделей, проведение вычислительных экспериментов, общий анализ;

[3, 4] – разработка структуры и текста компьютерной программы;

[16, 22, 23, 29] – проектирование технических решений, обработка результатов;

[14, 18, 20] – разработка основных теоретических положений;

[19, 24, 26, 27] – постановка задачи исследования, обработка результатов;

[28] – расчеты характеристик установки, обработка экспериментальных данных.

Подписано в печать «19» сентября 2014 г.  
Бумага «Потребительская» Печать: цифровая  
Усл. печ. л. 1

Формат 60x84 1/16  
Тираж 120 экз.  
Заказ №

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Издательский центр СибГИУ