

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО»**

УДК 62-83:622.673.1

**Овсянников Константин Валерьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ  
УСТАНОВОК С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ПАРАМЕТРОВ**

05.09.03 – Электромеханические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Могилев 2004

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Белорусско-Российского университета.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Ленецкий Г.С., заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Белорусско-Российского университета

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Тариков Георгий Петрович, заведующий кафедрой «Детали машин» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Кандидат технических наук, доцент, Петренко Юрий Николаевич, кафедра «Электропривод и АПУ» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация – Белорусский государственный технологический университет, кафедра «Автоматизация технологических процессов и электротехники»

Защита состоится 17 декабря 2004 г. в 10<sup>00</sup> час. на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» по адресу: пр-т Октября, 48, корп. 1, ауд. 516.

Реферат диссертации в 2-х экземплярах просим высылать и предварительно отправлять по факсу 8-0232-47-91-65 232-47-91-65) на имя ученого секретаря совета по за-

ознакомиться в библиотеке Учреждения образований Гомельский технический университет имени П. О. Су-

2004 г.

Е. А. Храбров

© Овсянников К. В., 2004

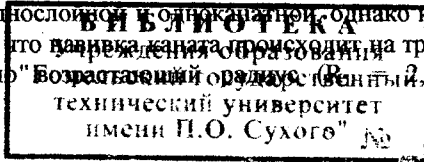
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Республика Беларусь является ведущим экспортером калийных удобрений. Доля белорусских калийных удобрений на мировом рынке составляет 30%, эти удобрения добываются на РУП ПО «Беларуськалий», г. Солигорск. Для данного предприятия актуальной темой является повышение надежности и долговечности грузоподъемных установок, т.е. оборудования, которое используется для подъема калийных удобрений. В абсолютном большинстве грузоподъемных установок (ГПУ) имеется упругий элемент – канат, который имеет конечную жесткость. Так как длина каната может достигать 1-2 км, то классический подход исследования затруднен или вовсе не применим, поэтому канат необходимо представлять как объект с распределенными параметрами (РП). Этот элемент существенно влияет на процессы подъема и скорость подъема. Построение системы автоматического управления (САУ) электроприводом (ЭП) ГПУ с учетом свойств объекта с РП позволит существенно повысить как производительность данных объектов, надежность работы оборудования, так и безаварийность, а в условиях рыночной экономики прибыль напрямую связана с надежной и безаварийной работой. Таким образом, надежность и качество работы ГПУ существенно зависят от САУ, которая должна учитывать упругие свойства каната как объекта с РП.

В настоящее время в электромеханической системе ГПУ отсутствуют САУ, которые учитывали бы распределенную природу объекта управления, хотя очевидно, что эти знания позволили бы значительно увеличить не только скорость подъема (производительность), но и увеличить надежность, срок службы ГПУ, а также резко сократить срок простоев оборудования, связанных с наладкой, ремонтом и ревизией ГПУ.

Проектирование САУ с учетом распределенности параметров позволит резко снизить пиковые нагрузки в узлах механизмов, что позволит сократить расходы на ремонт ГПУ, продлить срок службы канатов, что, в свою очередь, уменьшит расходы на их покупку и замену. Точная и адекватная математическая модель САУ ЭП ГПУ позволит заранее выявить опасные режимы работы, т.е. предсказать их, а следовательно, и учесть. Это особенно актуально на грузопассажирских установках. Построение и наличие адекватных моделей позволяет исследовать динамику объектов без построения реальных установок и САУ к ним. Это позволяет выполнять разработки новых алгоритмов управления с учетом распределенности параметров. Новые САУ дают возможность снять напряжения в узлах и механизмах ГПУ и увеличить срок службы установок в целом.

Перечисленные выше аргументы говорят об актуальности проведения исследований электромеханических систем (ЭМС) с учетом РП их элементов. Вся работа была проведена на основании данных ГПУ с бицилиндроконическим барабаном (БЦК), и в дальнейшем под ГПУ будет подразумеваться ГПУ с БЦК. Данная ГПУ является одноослонной, однако торенная часть выполнена таким образом, что канат каната происходит на три участка, один из которых имеет линейно-возрастающий радиус (рис. 1,  $R_1 = 2,5$  м,  $R_2 = 4$  м;



$R_{д} = 2,5 \dots 4$  м). Из-за изменения радиуса навивки и длины канатов изменяются момент нагрузки и момент инерции по сложному нелинейному закону. Система электропривода Генератор-Двигатель.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Данная работа выполнялась в соответствии с научно-исследовательской работой в 2000 г. за № Гос. рег. 2000843 «Исследование электромеханической системы с распределенными параметрами шахтного подъемника БЦК», а также в соответствии с договором с РУП «Могилевлифтомаш» 2002 г. «Снижение динамических нагрузок в механических узлах лифта, разработка системы управления электроприводом лифта, разработка систем контроля и диагностики лифта» и договором с РУП ПО «Беларуськалий» «Снижение динамических нагрузок в узлах грузоподъемных установок БЦК, разработка системы управления электроприводом грузоподъемной установки БЦК».

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке принципов построения, структур, методов, алгоритмов и программного обеспечения для анализа и синтеза ЭП ГПУ с учетом РП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать математическое описание ГПУ как подсистемы электромеханической системы и исследовать влияние ее парциальных параметров.

2. Разработать математическое описание ГПУ как подсистемы электромеханической системы с учетом РП каната, провести его исследование, на основании полученных данных произвести аппроксимацию конечномерной моделью. Исследовать ее адекватность, выполнить частотный анализ.

3. Разработать математические описания двигателя постоянного тока (ДПТ) и генератора постоянного тока (ГПТ) с учетом их большой мощности.

4. Выполнить синтез САУ ЭП ГПУ как ЭМС с РП.

5. Сформулировать принципы построения, разработать алгоритмы и программное обеспечение на их основе для анализа и синтеза электромеханических систем, содержащих элементы с РП.

6. Выполнить анализ результатов синтеза САУ ЭП ГПУ с обратной связью (ОС) по дополнительной координате в сравнении с исходной САУ ЭП.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – САУ ЭП ГПУ, установленный на втором руднике РУП ПО «Беларуськалий» г. Солигорска. Предмет исследования – электромеханическая система объекта как система с РП.

Гипотеза. Предполагалось, что улучшение качества управления ЭП ГПУ существенно зависит от дополнительной ОС по скорости промежуточной координаты упругого элемента, выбранной специальным образом.

Методология и методы проведения исследований. При аналитическом исследовании электромеханических систем с РП использовались традиционные методы интегрального, дифференциального и операционного (по Лапласу) исчислений.

Численный анализ САУ осуществлялся на ПЭВМ по специальной, разработанной автором программе NumDev, а также с использованием программного обеспечения (ПО) фирмы The MathWorks, Inc.

Адекватность полученных конечномерных моделей оценивалась при помощи методов частотного анализа, путем сравнения их с базовыми бесконечномерными моделями.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Разработана математическая модель САУ ЭП ГПУ с БЦК, исследовано влияние парциальных параметров, выявлен небезопасный режим работы с недогруженным скипом.

Разработан способ получения конечномерной модели произвольного порядка ЭМС, содержащей звенья с РП.

Разработаны математические модели ДПТ и ГПТ, учитывающие влияние нелинейности кривой намагничивания и вихревых токов возбуждения.

Впервые произведен синтез САУ ЭП ГПУ, содержащей звено с РП, с ОС по промежуточной координате упругого элемента.

Разработано новое ПО NumDev для численного анализа САУ с РП, пригодное как для исследования САУ ЭП, так и для исследования любых инженерных систем, описываемых системами дифференциальных уравнений.

Практическая значимость полученных результатов. Получена методика аппроксимации бесконечномерных моделей, пригодная для инженерных расчетов. Предложена методика синтеза САУ ЭП ГПУ с дополнительной обратной связью по скорости.

Предложены методики проектирования, математические модели, программное обеспечение, которые можно использовать при проектировании САУ ЭП ГПУ, грузопассажирских подъемных установок, лифтов.

Основные результаты теоретических исследований, полученные в работе, используются на РУП ПО «Беларуськалий» г. Солигорска, на РУП «Могилевлифтмаш» г. Могилева, в Белорусско-Российском университете при подготовке инженеров по специальности Т11.02 «Автоматизированный электропривод», при чтении лекций по специальной дисциплине «Компьютерные системы для исследования электромеханических систем с распределенными параметрами», используются в курсовом и дипломном проектировании, а также при проведении научно-исследовательских работ на кафедре «ЭП и АПУ».

Экономическая значимость полученных результатов. Экономическая значимость заключается в улучшении технических характеристик ГПУ, в увеличении надежности ЭП установки и его безаварийной эксплуатации.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Математическая модель механической подсистемы ЭМС ГПУ, содержащая звенья с РП и результаты моделирования.
2. Инженерная методика получения аппроксимированной конечномерной модели механической подсистемы ЭМС ГПУ.
3. Программное обеспечение NumDev для численного анализа САУ ЭП.
4. Принцип построения и инженерная методика синтеза САУ ЭП ГПУ с ОС по промежуточной координате упругого элемента.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его участии. Гипотеза и общие направления исследований были реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительный отзыв на:

- IV Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2001 г.);

- Научно-производственной конференции «Практическая подготовка специалистов и ее соответствие потребностям социально ориентированной рыночной экономики» (г. Могилев, 1999 г.);

- Международной электронной конференции по электроприводу «Перспективные технологии автоматизации» (г. Вологда, 1999 г.);

- Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 2004 г.).

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в пяти статьях журналов, трех рукописях, депонированных в Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы (БелИСА), в одной статье сборника трудов международной электронной конференции, шести тезисах докладов. Всего объем опубликованных материалов составляет 84 страницы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 179 страниц, в том числе 59 рисунков на 50 страницах, 9 таблиц на 6 страницах, 4 приложения на 38 страницах и список из 80 использованных источников на 7 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении рассматривается современное состояние в области разработки САУ ЭП ГПУ. Показано, что проектирование и создание быстродействующих и высоконадежных САУ ЭП постоянного тока с широким диапазоном регулирования скорости невозможно без учета механических характеристик объектов управления. Исследование объектов, содержащих подсистемы с РП, поиск новых методов управления ЭП данных объектов были и остаются актуальными задачами.

Первая глава посвящена анализу принципов построения и вариантов исполнения современных ГПУ разработке их классификации, а на их основе - кинематических схем механической подсистемы ЭМС. Приведены общие сведения, принципы их построения, достоинства и недостатки. Подробно рассмотрена кинематическая схема ГПУ с БЦК. Сделан вывод, что ГПУ с БЦК обладает одной из самых сложных коренных частей, т.к. в ней используется барабан с

переменным радиусом навивки каната, что в свою очередь необходимо учитывать при анализе процессов происходящих в САУ ЭП ГПУ.

Выполнен анализ и разработана классификация кинематических схем ГПУ. Механическая часть ГПУ, в общем случае, представляет собой многомассовую разветвленную систему. В нее входят следующие сосредоточенные массы: на валу двигателя, поднимающегося скипа, опускающегося скипа, а также распределенные массы поднимающейся и опускающейся ветвей канатов. Механическая часть системы подъема обычно представляется в виде расчетной схемы, состоящей из масс, соединенных связями с различной жесткостью.

При описании рабочих диаграмм подъемов обычно используют параметры, связанные с линейным перемещением. С учетом только упругих свойств канатов расчетную схему механической части можно представить состоящей из трех сосредоточенных масс, связанных упругими весовыми связями-канатами (рис. 1). Динамика канатов описывается известными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} + m_{1k} \frac{\partial v}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{m_{1k} \cdot a^2} \frac{\partial F}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $m_{1k}$  – масса 1 м каната;  $a$  – скорость распространения волны упругой деформации каната;  $x$  – координата сечения каната (Лагранжа – координата);  $F$ ,  $v$  – усилие в рассматриваемом сечении каната и скорость его перемещения соответственно.

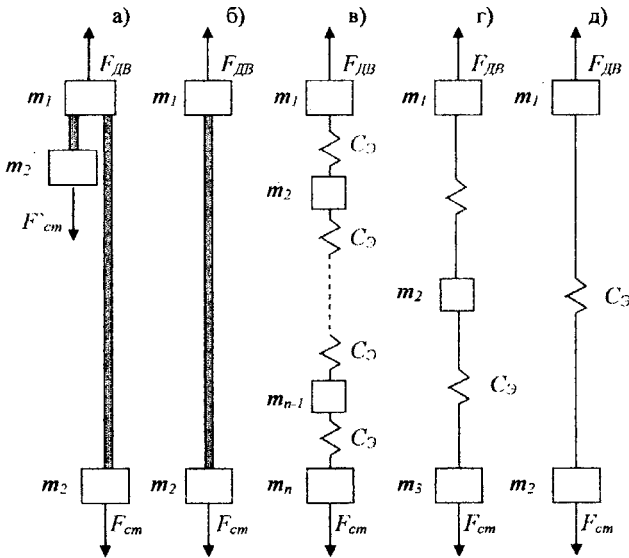


Рис. 1. Расчетные схемы механической подсистемы ЭМС ГПУ

На рис. 1. сделаны следующие обозначения:  $F_{дв}$  – усилие на валу двига-

теля;  $F_{cm}$  – усилие на скипе;  $C_{\partial}$  – эквивалентная жесткость;  $m_i$  – соответствующая масса.

При анализе динамических процессов в механической части и их влияния на динамические процессы в ЭМС в целом, рассматривается один из вариантов, при котором влияние динамических процессов максимально. Этому варианту соответствует расчетная схема, в которой нагруженный сосуд находится в крайнем нижнем положении, а порожний сосуд или противовес – в крайнем верхнем положении. При таком варианте расчетная схема может быть упрощена, ввиду того, что длина ненагруженной ветви каната будет во много раз меньше длины нагруженной ветви каната. В силу этого можно пренебречь упругими свойствами ненагруженной ветви каната, и массу этой ветви  $m_2'$  прибавить к массе  $m_1$ . Исходная расчетная схема преобразуется в схему с двумя сосредоточенными массами (рис. 1, б). Динамические процессы в такой системе описываются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta F(x, t)}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial \Delta v(x, t)}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial \Delta v(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{E \cdot s} \cdot \frac{\partial \Delta F(x, t)}{\partial t} &= 0 \\ m_1 \frac{d\Delta v_{\text{в}}}{dt} &= \Delta F_{\text{Д}}(t) - \Delta F_{\text{В}}(t) \\ m_2 \frac{d\Delta v_{\text{н}}}{dt} &= \Delta F_{\text{Н}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

при граничных условиях

$$\left. \begin{aligned} F(x, t)|_{x=l_m} &= F_{\sigma}(t) \\ F(x, t)|_{x=0} &= F_{\text{н}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (2) относительно усилий в нижнем и верхнем сечениях каната представляет собой сумму постоянной и переменной составляющих.

Дальнейшее упрощение расчетной схемы общеизвестно. При возрастающих требованиях к ЭМС ГПУ наиважнейшим становится выявление особенностей расчета механического звена, связанных с волновой природой упругого элемента, и в дальнейшем исследовании за исходную расчетную схему будет принята схема, изображенная на рис 1, б.

*Вторая глава* посвящена разработке и исследованию математического описания механической подсистемы ЭМС ГПУ. При разработке математической модели необходимо было учесть то, что при подъеме изменяются парциальные параметры ГПУ: момент нагрузки; моменты инерции; диаметр намотки каната; длина каната; радиус навивки канатов.

Для учета влияния этих параметров на ЭМС ГПУ было разработано математическое описание коренной части ГПУ. Все зависимости строились в функции поворота вала двигателя. При этом учитывалось, что навивка канатов



осуществляется по винтовой линии и по конической винтовой линии.

Полученные зависимости исследовались численно. При этом было выявлено, что при не полной нагрузке подъемного сосуда статический момент меняет знак на противоположный. Данная особенность обуславливается тем, что статический момент является функцией, напрямую зависящей от радиуса намотки каната. Изменение радиуса приводит к колебаниям статического момента на валу двигателя. Особенно неблагоприятно изменение знака момента нагрузки (рис. 2), так как оно влечет за собой режим биений (влияние зазора в соединительной муфте в результате износа), что может привести к аварийному режиму работы. Выявленная зависимость показывает, что наиболее опасным, с данной точки зрения, является режим работы со значительной недогрузкой (15 % от номинального момента). Этот режим особенно опасен, потому что характерен для наладочных, инспекционных и ремонтных работ в стволе шахты, когда в скипе находятся ремонтные бригады.

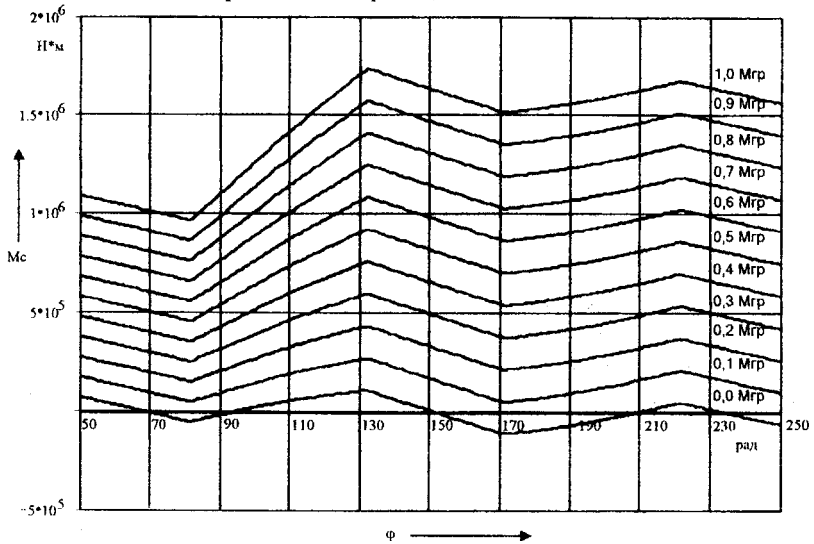


Рис. 2. Статические моменты механизма при изменении  $M_{гр}$  (0...1 Мгр)

*В третьей главе* был произведен анализ принципов построения и разработано математическое описание электрической части ЭМС ГПУ. Был проведен сравнительный анализ редукторного и безредукторного ЭП.

Приведена классификация и сделан анализ существующих систем ЭП ГПУ применяемых в горной промышленности. Сформулирован ряд требований, предъявляемых к ЭП ГПУ:

- ограничение средних ускорений при разгоне и останове;
- применение плавных и непрерывных систем изменения усилия при торможении механическим тормозом;
- необходимость многодвигательных схем ЭП в связи с применением двухприводных редукторов (а также с возможностью установки двух редукто-

ров на одну ГПУ);

– необходимость двигательного режима в период останова ГПУ и возможность непрерывных переходов от двигательного режима к режиму электрического торможения.

Данным требованиям удовлетворяют две системы ЭП: система генератор-двигатель (Г-Д) и система тиристорный преобразователь-двигатель. Указаны их достоинства и недостатки.

Разработаны математические модели элементов ЭП постоянного тока, а именно ДПТ и ГПТ, т.к. ГПУ оснащена системой Г-Д.

Математические модели ДПТ и ГПТ строились с учетом влияния реакции якоря, вихревых токов (вихревые токи возникают в массивных частях магнитной системы двигателя при изменении магнитного потока, действие вихревых токов может приближенно рассматриваться как действие расположенной на полюсах машины дополнительной короткозамкнутой обмотки) и с учетом нелинейности кривой намагничивания. Учет нелинейности кривой намагничивания производился при помощи аппроксимации кривой полиномом заданной формы. Аппроксимирующая зависимость получена в виде полинома пятого порядка:

$$F(x) = 0,02 + 1,355x - 6,129x^2 + 16,581x^3 - 18,276x^4 + 7,450x^5 \quad (4)$$

В результате были получены структурные схемы ДПТ и ГПТ.

На рис. 3 и 4 приведены детализированные структурные схемы ДПТ и ГПТ с учетом нелинейности кривой намагничивания, с учетом вихревых токов и с учетом реакции якоря, построенные в среде Simulink пакета Matlab. Функция  $f(u)$  различна в зависимости от метода аппроксимации. Из методов аппроксимации (линейная, кусочно-линейная, полиномиальная) наиболее пригодной является полиномиальная, т.к. она наиболее точно описывает кривую намагничивания.

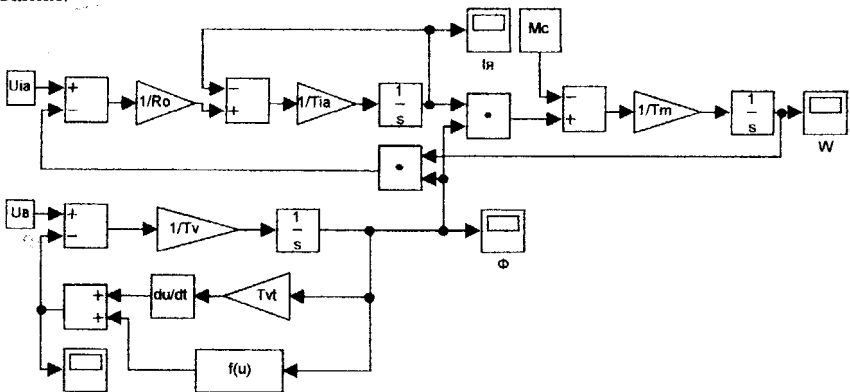


Рис. 3. Детализированная структурная модель ДПТ

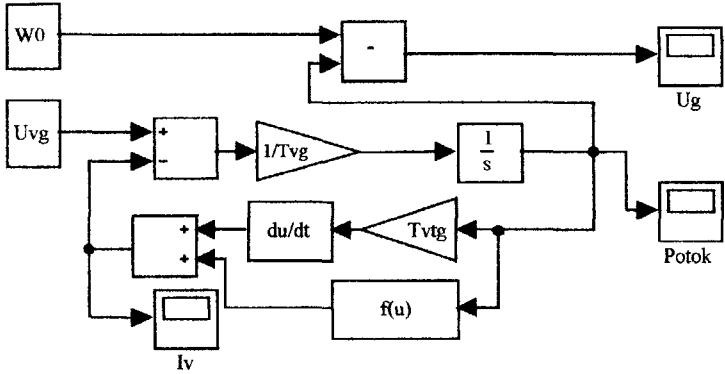


Рис. 4. Детализированная структурная модель ГПТ (Simulink 2.0)

В четвертой главе разработано математическое описание элементов с РП механической подсистемы САУ ЭП ГПУ. Математическое описание основано на применении интегрального преобразования Лапласа (операционный метод). Элементы с РП очень разнообразны, различаются структурами, типами граничных и начальных условий. Для каждой конкретной задачи исследования динамики ЭП с РП механических элементов необходимо выбирать наиболее рациональный способ определения их передаточных функций (ПФ).

ЭП ГПУ содержит объект с РП и, следовательно, описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Для полной характеристики его передаточных свойств необходима двухточечная функция:

$$W(x_2, x_1, p) = Y(x_2, p) / F(x_1, p), \quad x_1 \in P, \quad x_2 \in Q, \quad (5)$$

где  $P$  – множество точек приложения входного воздействия;  $Q$  – множество точек, в которых наблюдается выходной сигнал;  $Y(X_2, p)$  и  $F(X_1, p)$  – преобразования Лапласа по времени от выходного сигнала и входного воздействия.

Для определения ПФ элементов с РП в работе используется прямой метод.

Влияние параметров каната на динамику ЭП ГПУ будет наибольшим при расположении сосуда в крайнем нижнем положении. Тогда динамические процессы согласно расчетной схеме (см. рис. 1, б) описываются системой уравнений (2). Введя базовые величины  $a = \sqrt{E \cdot s / \rho}$  – скорость распространения волны упругой деформации по канату;  $E$  – модуль упругости;  $s$  – сечение каната;  $\rho$  – плотность;  $T_{\text{РП}} = l/a$  – время прохождения волны,  $l$  – длина каната,  $m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + \rho l$  – суммарная приведенная масса,  $F_{\Sigma} = m_{\Sigma} a / T_{\text{РП}}$  и приняв следующие обозначения  $\varphi = F / F_{\Sigma}$ ,  $\mu_i = m_i / m_{\Sigma}$ ,  $\nu = v/a$ ,  $\tau = t / T_{\text{РП}}$ ,  $\xi = x/l$ ,  $m_k = \rho / m_{\Sigma}$ , уравнения (2) в относительных единицах запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta \varphi(\xi, \tau)}{\partial \xi} + \mu_k \cdot \frac{\partial \Delta v(\xi, \tau)}{\partial \tau} &= 0 \\ \frac{\partial \Delta v(\xi, \tau)}{\partial \xi} + \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{\partial \Delta \varphi(\xi, \tau)}{\partial \tau} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

с граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 \cdot \frac{\partial \Delta v(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\xi=0} &= \Delta \varphi_0(\tau) - \Delta \varphi(0, \tau) \\ \mu_2 \cdot \frac{\partial \Delta v(\xi, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{\xi=1} &= \Delta \varphi(1, \tau) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Применив преобразование Лапласа по относительному времени  $\tau$  и обозначив оператор Лапласа по времени через  $p$ , получаются уравнения, представляющие собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, для решения которых применяется еще раз преобразование Лапласа, но уже по длине  $\xi$ . Обозначим оператор Лапласа по длине через  $\lambda$ . Получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \lambda \cdot \Delta \varphi(\lambda, p) - \varphi(0, p) + \mu_k \cdot p \cdot \Delta v(\lambda, p) &= 0 \\ \lambda \cdot \Delta v(\lambda, p) - v(0, p) + \mu_k^{-1} \cdot p \cdot \Delta \varphi(\lambda, p) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

из которых при нулевых начальных условиях:

$$\left. \begin{aligned} \Delta v(\lambda, p) &= \frac{[\lambda \cdot v(0, p) - \mu_k^{-1} \cdot p \cdot \varphi(0, p)]}{\lambda^2 - p^2} \\ \Delta \varphi(\lambda, p) &= \frac{[\lambda \cdot \varphi(0, p) - \mu_k \cdot p \cdot v(0, p)]}{\lambda^2 - p^2} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Переходя из области изображений по переменной  $\lambda$  к оригиналу по переменной  $\xi$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta v(\xi, p) &= A \cdot \text{ch}(p \cdot \xi) - \mu_k^{-1} \cdot B \cdot \text{sh}(p \cdot \xi) \\ \Delta \varphi(\xi, p) &= B \cdot \text{ch}(p \cdot \xi) - \mu_k \cdot A \cdot \text{sh}(p \cdot \xi) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Для нижнего конца каната ( $\xi = 1$ ):

$$\left. \begin{aligned} \Delta v(1, p) &= A \cdot \text{ch}(p) - \mu_k^{-1} \cdot B \cdot \text{sh}(p) \\ \Delta \varphi(1, p) &= B \cdot \text{ch}(p) - \mu_k \cdot A \cdot \text{sh}(p) \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Из граничных условий

$$\left. \begin{aligned} \Delta v(\xi, p) \Big|_{\xi=0} &= \Delta v(0, p) \\ \Delta v(\xi, p) \Big|_{\xi=1} &= \frac{\Delta \varphi(1, p)}{\mu_2 \cdot p} \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

определяются постоянные  $A$  и  $B$ :

$$A = \Delta v(0, p), \quad (13)$$

$$B = \mu_k \cdot \frac{p \cdot \mu_2 \cdot \text{ch}(p) + \mu_k \cdot \text{sh}(p)}{p \cdot \mu_2 \cdot \text{sh}(p) + \mu_k \cdot \text{ch}(p)} \cdot \Delta v(0, p). \quad (14)$$

Тогда ПФ движущего усилия к скорости перемещения для любого сечения каната выглядит так:

$$W(p) = \frac{\Delta v(\xi, p)}{\Delta \varphi_n(p)} = \frac{\text{ch}(p \cdot \xi) - K(p) \cdot \text{sh}(p \cdot \xi)}{\mu_1 \cdot p + K(p) \cdot \mu_k}, \quad (15)$$

где  $K(p) = (p \cdot \mu_2 \cdot \text{ch}(p) + \mu_k \cdot \text{sh}(p)) / (p \cdot \mu_2 \cdot \text{sh}(p) + \mu_k \cdot \text{ch}(p))$ .

ПФ механической подсистемы была аппроксимирована, т.к. использование методов прямого анализа и синтеза САУ ЭП с подобными ПФ весьма затруднительно из-за их трансцендентности. Выбор аппроксимирующей ПФ  $W^*(p)$  (или в частотной области – частотной характеристики) для заданного класса входных воздействий определяется на основе соответствующих условий близости к точной ПФ  $W(p)$  объекта. Поскольку в ЭП входные воздействия на объект с РП со стороны подсистемы с сосредоточенными параметрами можно считать функциями с ограниченным спектром, а сама сосредоточенная система имеет ограниченную полосу пропускания, для целей аппроксимации достаточно, чтобы  $W^*(p)$  хорошо аппроксимировала  $W(p)$  лишь в некотором круге  $|p| < \Omega$ , что соответствует диапазону частот  $0 < \omega < \Omega$ . При этом аппроксимацию необходимо проводить на основе определенных критериев качества аппроксимации ПФ в области  $|p| < \Omega$ .

Был проведен обзор методов аппроксимации объектов с РП. Сделан вывод о целесообразности использования метода разложения на простейшие дроби. Предлагается следующий принцип аппроксимации ПФ объектов с РП: аппроксимирующая модель с ПФ  $W^*(p)$  должна в области  $|p| < \Omega$  иметь те же полюса, что и ПФ объекта с РП  $W(p)$ , и главные части  $W(p)$  и  $W^*(p)$  в этих полюсах должны совпадать. Аппроксимирующая модель в этом случае может быть реализована представлением  $W^*(p)$  в виде отрезка ряда разложения по простейшим дробям ПФ  $W(p)$ , т. е.:

$$W^*(p) = \sum_{n=-N}^N \frac{\text{res}[W(p_n)]}{p - p_n} \quad (16)$$

Для нахождения аппроксимированной ПФ была предложена следующая методика:

- определяются парциальные параметры ГПУ (массы, жесткость каната);
- определяются относительные массы элементов ГПУ и каната;
- определяется полоса пропускания системы;
- строится ЛАЧХ бесконечномерной (исходной) модели;
- определяются полюса функции (в данном частотном диапазоне);
- определяются значения вычетов в полюсах;
- по формуле (16) находится конечномерная ПФ.

Аппроксимация  $W(p)$  рациональной функцией  $W^*(p)$  получается при обрывании ряда на члене, соответствующем  $n = N - 1$ .

Улучшение аппроксимации путем добавления нового члена не меняет ранее вычисленные коэффициенты. Приводя слагаемые в выражении к общему знаменателю, получаем ПФ аппроксимирующей модели в виде рациональной дроби.

В данной главе была получена аппроксимированная ПФ ГПУ.

В пятой главе произведен синтез САУ ЭП ГПУ, в которой используется информация из промежуточной координаты элемента с РП, а так же разработано специализированное ПО NumDev, которое применялось для исследования рабочего цикла ЭП ГПУ.

Наличие упругости в объекте управления оказывает существенное влияние на работу САУ и заставляет отходить от стандартных настроек жестких систем и применять дополнительные корректирующие связи.

В общем случае математическое описание сложного объекта с РП не позволяет достаточно точно визуализировать поведение объекта во временной области, а также произвести анализ влияния упругих свойств объекта на динамические характеристики ЭМС. Поэтому, для упрощения исследования объекта с РП, выполняется его аппроксимация в виде модели с сосредоточенными параметрами.

Основная трудность заключается в наличии у ПФ объекта ярко выраженных резонансных (антирезонансных) свойств, практически исключающих возможность расширения полосы пропускания разомкнутой системы за частоту первого резонанса данной системы при нерезонансном регуляторе.

Задача формирования требуемых динамических свойств ЭМС в целом может быть решена за счет использования дополнительных ОС. ОС подключенная особым способом, позволяет перераспределить нули и полюса ПФ, тем самым, сдвинув первые резонансы вправо, не прибегая к резонансным регуляторам.

Структурная схема для предлагаемого способа представлена на рис. 5, где  $W_{P1}$  – ПФ регулятора тока,  $W_{P2}(p)$  и  $W_{P3}(p)$  – ПФ дополнительного и главного регуляторов скорости;  $W_C(p)$  – ПФ силовой части ЭП;  $W_{P1P}(p)$  и  $W_{P1P}(p)$  – ПФ объекта с РП от точки входа до точек  $\xi$  и  $\xi_{\text{ВЫХ}} = 1$  соответственно.

Предлагаемый подход позволяет расширить полосу пропускания при определенном подключении дополнительной ОС по скорости. Известно, что частота среза контура в основном ограничивается порядком дифференцирующей составляющей регулятора. При этом существенно, что объекты с РП гиперболического типа обладают ярко выраженными свойствами дифференцирования, заключающимися в наличии у системы антирезонансов и, следовательно, нулей ПФ. Распределение нулей, зависящее от вида числителя ПФ, определяется координатой выхода системы, и, если имеется свобода ее выбора, появляется возможность формировать у системы необходимое положение нулей, придавая ей заданные форсирующие свойства без усложнения регулятора.

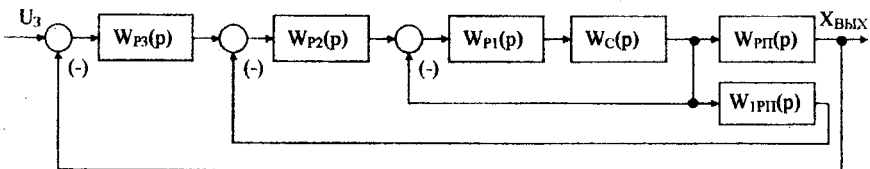


Рис. 5. Структурная схема синтезируемой системы

ОС выбирается таким образом, чтобы обеспечить на возможно большем диапазоне частот чередование полюсов и нулей ПФ или, что то же самое, чередование резонансов и антирезонансов частотной характеристики.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ), (рис. 6), иллюстрирует данный подход. Штриховой линией нанесена ЛАЧХ системы без дополнительного контура по пространственной координате, а сплошной – с дополнительным контуром. В исходной системе первый резонанс расположен на частоте 0,53 рад/с, а в скорректированной на частоте 1,36 рад/с. Т.е. полоса пропускания системы расширена более чем в 2,5 раза. Кроме этого, ЛАЧХ полученной системы на диапазоне 0 – 10 рад/с имеет только один резонанс, а не четыре как в исходной системе, т.е. фактически это означает, что при введении дополнительного контура спектр собственных частот системы смещается вправо. Это приводит к тому, что резонансы на более высоких частотах влияют гораздо меньше из-за меньшего коэффициента усиления, по сравнению с исходной системой.

Также в данной главе была рассмотрена математическая модель с учетом дополнительной ОС по скорости конечной точки объекта. Была показана принципиальная возможность замыкания системы.

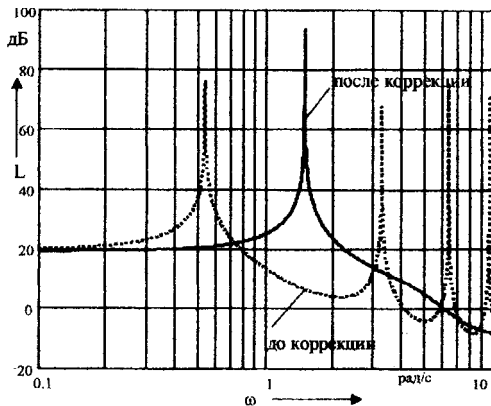


Рис. 6. ЛАЧХ ЭП ГПУ

Была исследована устойчивость ЭП при подобной коррекции. Для исследования устойчивости систем с РП не применимы стандартные критерии устойчивости, в частности, все алгебраические критерии, ввиду того, что характеристическое уравнение этих систем имеет бесконечное количество корней. При исследовании устойчивости данных систем можно применять метод определения устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам. Система при использованной коррекции устойчива. Дополнительные исследования показали, что система также устойчива с ПИ-регулятором, что дает возможность применять при настройке системы П- или ПИ-регулятор.

Переходные процессы скоростей первой и второй массы, а также некоторой промежуточной точки объекта с РП приведены на рис. 7, для исходной

САУ и для скорректированной. Как видно, при подобной коррекции удается значительно снизить перерегулирование (с 50 до 30 % с П-регулятором и до 20 % с ПИ-регулятором). Коррекция не затрагивает настройки исходной САУ, регулятор имеет стандартную структуру, не имеет ни резонансных частот, ни узкополосных фильтров.

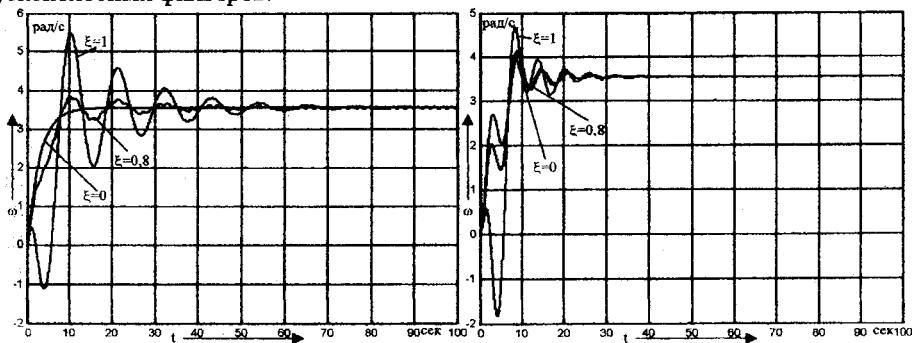


Рис. 7. Переходные процессы скорости в исходной и полученной системе

Таким образом, была получена система автоматического управления с расширенной полосой пропускания без применения резонансного регулятора. Следует отметить, что реальные системы не всегда могут быть замкнуты по произвольной пространственной координате ввиду особенностей их конструктивного исполнения. Однако интенсивное развитие вычислительной техники дает возможность применять в таких системах вычислители, восстанавливающие недостающую информацию.

Была получена полная математическая модель ЭМС ГПУ с учетом изменения всех парциальных параметров, расчет которых был произведен в гл. 2, а также с учетом нелинейностей в регуляторах. На модели исследованы процессы в САУ ЭП ГПУ при изменении парциальных параметров ГПУ.

При работе ГПУ (подъем) уменьшается длина канатов, а следовательно, изменяются следующие величины, существенно влияющие на статические и динамические характеристики ГПУ: длина канатов; радиус навивки канатов; статический момент; приведенные массы и масса каната.

Данные зависимости были получены (гл. 2) в функции изменения угла поворота вала ГПУ. Наибольший интерес представляет задача моделирования ЭП ГПУ, т.к. в процессе цикла подъема изменяются параметры установки, а следовательно, необходимо на каждом шаге интегрирования заново аппроксимировать ПФ объекта с РП. Задача непрерывной аппроксимации разделяется на две подзадачи:

- 1) вычисление вычетов ПФ;
- 2) вычисление корней ПФ.

Вычисление вычетов ПФ не представляет особой сложности и достаточно просто реализуется при помощи S-функций в пакете MatLab 6.

Вычисление корней ПФ затруднено в связи с тем, что в знаменателе присутствуют трансцендентные функции – гиперболические синусы и косинусы.



Однако пренебречь изменением корней ПФ функции нельзя, т.к. в процессе подъема они существенно изменяются (рис. 8). При подъеме спектр частот смещается влево, что хорошо заметно на примере первой резонансной частоты.

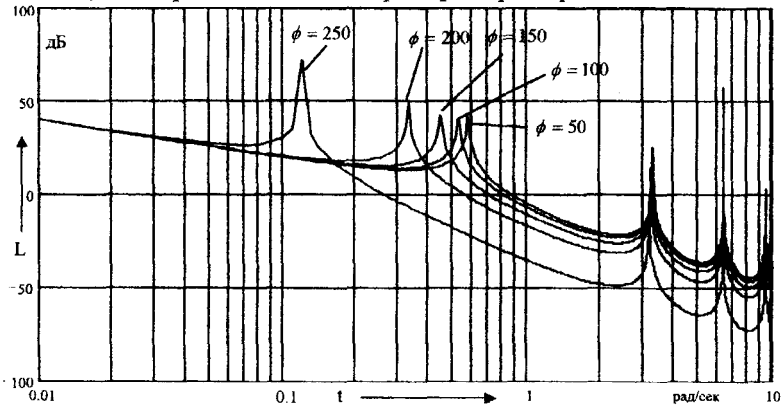


Рис. 9. Изменение резонансных частот в процессе подъема

Учет изменения резонансной частоты был сделан при помощи аппроксимации исходной зависимости полиномом невысокого порядка, в данном случае при помощи полинома 3-го порядка, ошибка аппроксимации при этом не превышает 3 %.

Остальные зависимости были реализованы S-функциями на языке Си.

Таким образом, с учетом всех вышеприведенных особенностей, а также с учетом структурных моделей ДПТ с НВ и ГПТ (рис. 3 и 4) была построена математическая модель ЭМС ГПУ с учитывающая изменение парциальных параметров, нелинейностей регуляторов и статического момента. Данная модель приведена на рис. 9.

На полной модели получены переходные процессы скорости и тока якоря (исходная САУ, паспортные настройки) и сравнены с осциллограммами, полученными на ГПУ БЦК. Адекватность теоретической модели подтверждается совпадением по виду и по величине переходных процессов модели и экспериментальных данных ЭМС ГПУ БЦК.

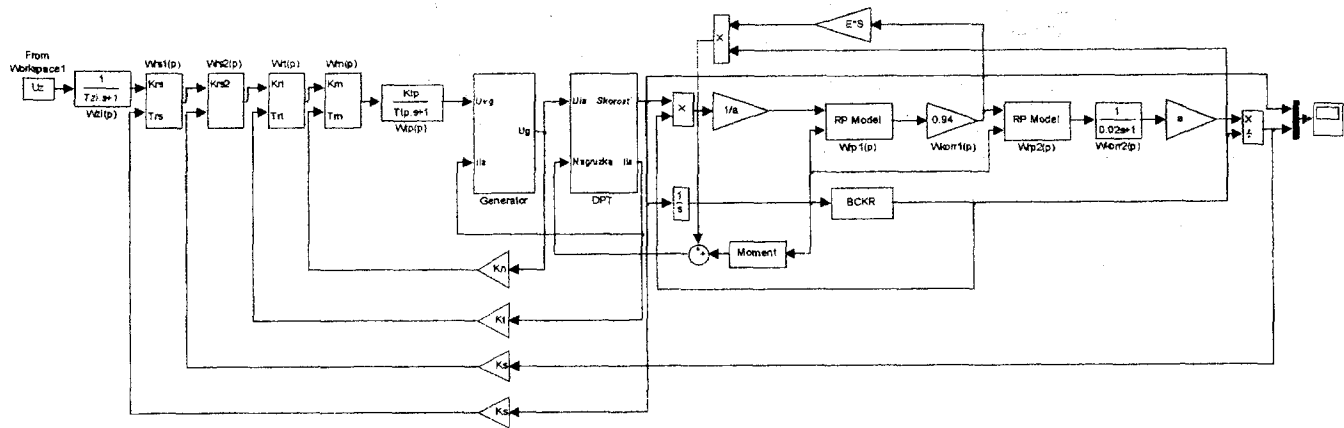


Рис. 9. Структурная модель САУ ЭП ГПУ БЦК с учетом изменения парциальных параметров, нелинейностей регуляторов и статического момента

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена научно-прикладная задача по совершенствованию электроприводов грузоподъемных установок с учетом распределенности их параметров. Это подтверждается следующими результатами, полученными в данной диссертационной работе.

1. Разработана математическая модель ГПУ, на которой можно определять изменение основных параметров установки при подъеме груза. На математической модели произведено численное исследование изменения радиусов навивки, длин навитых на барабан канатов, моментов инерции, создаваемых канатами, навитыми на барабан, моментов инерции поступательно движущихся скипов и канатов, статических моментов, создаваемых поступательно движущимися частями, а также суммарного момента инерции механизма в зависимости от угла поворота вала двигателя. Выяснено, что наиболее опасным является режим работы скипа с недогрузкой (до 15 % от номинального момента). Этот режим особенно опасен, потому что характерен для наладочных, инспекционных и ремонтных работ в стволе шахты, когда в скипе находятся ремонтные бригады [1, с. 34-38; 2, с. 18-21; 4, с. 18-20].

2. Представлена математическая модель каната как упругого элемента на основе решения краевой задачи. Показано решение данной краевой задачи, получена ПФ механической подсистемы ЭМС ГПУ с использованием конечно-мерной аппроксимации отрезком ряда разложения по простейшим дробям. ПФ получена в виде рациональной дроби и пригодна для исследования при помощи классического математического аппарата. Исследовано влияние количества учетных резонансов на точность модели в существенном диапазоне частот [5, с. 19-26; 7, с. 80; 9, с. 158; 11, с. 40].

3. Разработаны математические модели элементов ЭП постоянного тока большой мощности: ДПТ с НВ и ГПТ. Приведены различные модели с учетом влияния вихревых токов возбуждения и нелинейности кривой намагничивания. [8, с. 89; 15].

4. Представлен принцип построения и инженерная методика синтеза САУ ГПУ с ОС по промежуточной координате упругого элемента или по координате скипа. Показана принципиальная возможность получения устойчивой САУ. Произведен синтез САУ с распределенными параметрами. Получена математическая модель ГПУ БЦК с учетом изменения парциальных параметров, нелинейностей, статических моментов [3, с. 73-76; 10, с. 159; 12, с. 40-41].

5. На разработанном ПО проведен численный анализ математической модели САУ ЭП ГПУ БЦК с учетом распределенности параметров механической части, который подтвердил адекватность полученной модели [10, с. 159; 13, с. 32-33; 14, с. 63].

6. Полученные принципы построения, математические модели и методики расчета переданы РУП «Могилевлифтмаш», РУП ПО «Беларуськалий» для внедрения [3, с. 73-76; 5, с. 19-26; 9, с. 158].

**БИБЛИОТЕКА**  
Учреждения образования  
"Гомельский государственный  
технический университет  
имени П.О. Сухомлинского"

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В. Модели механических звеньев с распределенными параметрами подъемных установок //Весті НАН Беларусі. Сер. физ.- техн. навук.– 2003.– №2.– С. 34-38.
2. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В. Учет влияния зазора на переходные процессы в системах с распределенными параметрами //Энергетика (Известия ВУЗов).– 2003.– №4.– С. 18-21.
3. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В. Синтез системы управления электроприводом подъемной установки БЦК //Вестник МГТУ.– 2002.– №2.– С. 73-76.
4. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В. Повышение безопасности работы установок с бицилиндроконическим барабаном для рудников ПО «Беларуськалий» //Промышленная безопасность.– 2002.– №1.– С. 18-20.
5. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В. Конечномерные математические модели элементов с распределенными параметрами //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого.– №2.– 2002.– С. 19-26.
6. Овсянников К.В., Ленеvский Г.С. Анализ и классификация типовых кинематических схем стационарных подъемных установок, применяемых в горной промышленности /Могилев. гос. техн. ун-т.–Могилев, 2001.– 18 с.– Деп. в БелИСА 5.03.2001. – №Д200111 //Реферативный сборник не публикуемых работ. Вып. 1(20).- 2001.- С. 103.
7. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В. Исследование аппроксимированных передаточных функций распределенноупругих механических звеньев во временной области /Могилев. гос. техн. ун-т.–Могилев, 2002.– 16 с.– Деп. в БелИСА 7.03.2002. – №Д200213 // Реферативный сборник не публикуемых работ. Вып. 1(24).- 2002.- С. 80
8. Овсянников К.В. Анализ принципов построения электрической части грузоподъемных установок /Могилев. гос. техн. ун-т.–Могилев, 2002.– 18 с.– Деп. в БелИСА 7.03.2002. – №Д200214 // Реферативный сборник не публикуемых работ. Вып. 1(24).- 2002.- С. 89
9. Овсянников К.В. Аппроксимация бесконечномерных передаточных функций объектов с распределенными параметрами // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2004.– С. 158.
10. Овсянников К.В. Использование S-функций при моделировании в среде Matlab нестационарных объектов в электроприводе // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2004.– С. 159
11. Овсянников К.В. Использование метода разложения на простейшие дроби для аппроксимации объектов с распределенными параметрами //Новые

математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы IV Республиканской научной конференции студентов и аспирантов. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2001. – С. 40.

12. Овсянников К.В. Моделирование влияния момента нагрузки на режимы работы подъемной установки с БЦКБ // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы IV Республиканской научной конференции студентов и аспирантов. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2001. – с. 40-41.

13. Ленеvский Г.С., Овсянников К.В., Киселев А.В. Решение производственных задач в курсовом и дипломном проектировании с использованием математических пакетов Matlab и Mathcad // Практическая подготовка специалистов и ее соответствие потребностям социально ориентированной рыночной экономики: Тез. докл. обл. науч.-метод. конф. – Могилев: ММИ, 1999. – С. 32-33.

14. Г.С. Ленеvский, К.В. Овсянников, О.В. Борисов, А.В. Киселев. Использование новейших математических пакетов при исследовании сложных систем в электроприводе // Перспективные технологии автоматизации: Тез. докл. междунар. электронной науч.-техн. конф. – Вологда, 1999. – С. 63

15. Г.С. Ленеvский, К.В. Овсянников, Е.Н. Якубов. Исследование электромеханической системы с распределенными параметрами шахтного подъемника БЦК. Отчет о НИР (заключит.) / Могилевский машиностроительный институт; Рук. темы Г.С. Ленеvский – №ГР 2000843. – Могилев, 2000. – 33 с.

## РЕЗЮМЕ

Овсянников Константин Валерьевич

### Совершенствование электроприводов грузоподъемных установок с учетом распределенности их параметров

Электропривод постоянного тока, грузоподъемные установки, грузоподъемная установка с бицилиндроконическим барабаном, распределенные параметры, синтез систем управления, программное обеспечение, аппроксимация, частотный анализ, упругие механические звенья.

Объект исследования – система автоматического управления электроприводом грузоподъемной установки с бицилиндроконическим барабаном.

Предмет исследования – способы синтеза систем автоматического управления электроприводом грузоподъемных установок с учетом распределенности параметров механической подсистемы объекта.

Цель работы заключается в разработке принципов построения, структур, методов, алгоритмов и программного обеспечения для анализа и синтеза систем автоматического управления электроприводом грузоподъемной установки с учетом распределенности параметров.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в том, что:

- разработана математическая модель механической подсистемы ЭМС ГПУ, исследовано влияние парциальных параметров установки, выявлен небезопасный режим работы с недогруженным скипом;
- разработан способ получения конечномерной модели механической подсистемы ЭМС ГПУ, содержащей звенья с РП, произвольного порядка;
- разработаны математические модели двигателя постоянного тока и генератора постоянного тока, учитывающие влияние нелинейности кривой намагничивания и вихревых токов возбуждения;
- произведен синтез системы автоматического управления ЭП ГПУ, содержащей звено с РП, с обратной связью по промежуточной координате;
- разработано новое программное обеспечение NumDev для численного анализа систем автоматического управления ЭП, содержащих звенья с РП;
- получена методика аппроксимации бесконечномерных моделей механической подсистемы ЭМС, пригодная для инженерных расчетов;
- предложены методики проектирования, математические модели и их программное обеспечение, которые можно использовать при проектировании САУ ЭП ГПУ, грузопассажирских подъемных установок, лифтов.

Результаты исследования использованы на РУП «Могилевлифтмаш», РУП ПО «Беларуськалий».

Область применения – организации и предприятия, занимающиеся проектированием систем автоматического управления и эксплуатацией электроприводов подъемных механизмов.

## РЭЗІЮМЭ

Аўсяннікаў Канстанцін Валер'евіч

Удасканалванне электрапрывадаў грузапад'ёмных устаноўак з  
улікам размеркаванасці іх параметраў

Электрапрывад пастаяннага току, грузапад'ёмныя ўстаноўкі (ГПУ), грузапад'ёмная ўстаноўка з біцыліндракранічным барабанам, размеркаваныя параметры, сінтаз сістэм кіравання, праграмнае забеспячэнне, апраксімацыя, частотны аналіз, пруткія механічныя звёны.

Аб'ект даследавання – сістэма аўтаматычнага кіравання электрапрывадам грузапад'ёмнай ўстаноўкі з біцыліндракранічным барабанам.

Прадмет даследавання – спосабы сінтэзу сістэмаў аўтаматычнага кіравання электрапрывадам грузапад'ёмнай ўстаноўкі з улікам размеркаванасці параметраў.

Мэта працы заключаецца ў распрацоўцы прынцыпаў пабудовы; структур; метадаў, алгарытмаў і праграмнага забеспячэння для аналізу і сінтэзу электрапрывада грузапад'ёмнай устаноўкі з улікам размеркаванасці параметраў.

Навуковая і практычная значнасць атрыманых вынікаў заключаецца ў тым, што:

- распрацавана матэматычная мадэль механічнай падсістэмы ЭМС ГПУ, даследаваны ўплыў парцыяльных параметраў устаноўкі, выяўлены небяспечны рэжым працы з недагружаным скіпам;

- распрацаваны спосаб атрымання канечнамернай мадэлі механічнай падсістэмы ЭМС ГПУ, якая змяшчае звёны з РП, адвольнага парадку;

- распрацаваны матэматычныя мадэлі рухавіка пастаяннага току і генератара пастаяннага току, якія ўлічваюць уплыў нелінейнасці крывой намагнічвання і віхравых токаў узбуджэння;

- здзейснены сінтэз сістэмы кіравання ЭП ГПУ, якая змяшчае звязно з РП, з зваротнай сувяззю па прамежнай каардынаце;

- распрацавана новае праграмнае забеспячэнне NumDev для лікавага аналізу сістэм аўтаматычнага рэгулявання ЭП, якія змяшчаюць звёны з РП;

- атрымана метадыка апраксімацыі бясконцамерных мадэляў механічнай падсістэмы ЭМС, прыгодная для інжынерных разлікаў.

- прапанаваны метадыкі праектавання, матэматычныя мадэлі і іх праграмнае забеспячэнне, якія можна выкарыстаць пры праектаванні САЎ ЭП ГПУ, грузапасажырскіх пад'ёмных устаноўак, ліфтаў.

Вынікі даследавання выкарыстаны на РУП "Магілёўліфтмаш", РУП ПА "Беларускалій".

Вобласць выкарыстання – арганізацыі і прадпрыемствы, якія займаюцца праектаваннем сістэмаў аўтаматычнага кіравання і эксплуатацыяй электрапрывадоў пад'ёмных механізмаў.

## RESUME

Ovsyannikov Konstantin Valerievich

Development of lifting facilities taking into consideration a distribution of its parameters.

**Index terms:** Direct-current drive, lifting facilities, bicylinder-conic drum lifting facility, distributed parameters, synthesis, software, approximation, frequency analysis, elastic mechanical linkage.

Object of research – bicylinder-conic drum lifting facility.

Subject of research – mechanical subsystem of the object as a distributed parameters system.

The purpose of the work consists in development of structures construction principals, methods, algorithms and software for lifting facilities electric drive analysis and synthesis taking into consideration the distribution of its parameters.

Scientific and practical significance of the results obtained consists in following:

- a mathematical model of the lifting facility has been worked out; an influence of partial parameters has been explored, insecure operation mode (the one with underload skip) has been disclosed,

- a method of system finite-dimensional model building up, for systems which contains links with random order distributed parameters, has been worked out;

- mathematical models of direct current motor, direct-current generator which take into consideration a non-linearity of B-H curve and excitation eddy currents have been worked out;

- a synthesis of control system which contains a distributed parameters link with intermediate coordinate feedback has been done .

- a new software for numerical analysis of automated control systems with contains distributed parameters links (NumDev) has been worked out;

- a technique for finite-dimensional models approximation which is suitable for engineering calculation has been worked out.

- design techniques, mathematical models and the corresponding software which could be used for cargo, cargo-and-passenger lifting facilities, lifts engineering have been proposed;

The results of the research have been used at Republic Unitarian Enterprise “Mogilevliftmash”, at Republic Unitarian Enterprise Production Association “Belaruskalii”

Field of application – Enterprises and Companies which are involved in design, engineering and exploitation of lifting facilities electric drives.



**Овсянников Константин Валерьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ  
УСТАНОВОК С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ПАРАМЕТРОВ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Редактор:

Червинская А.Т.

Подписано в печать 01.11.2004.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Усл.печ.л. 1.63. Уч.-изд. л. 1.79 Тираж 105 экз. Заказ №486

Государственное учреждение высшего профессионального образования

Белорусско-Российский университет.

Лицензия ЛВ № 02330/375 от 29.06.2004 г.