

На правах рукописи

КОПЫЛОВА Лариса Геннадьевна

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ  
С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»

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

Иваново 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор **Тарарыкин Сергей Вячеславович**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Староверов Борис Александрович**  
кандидат технических наук, доцент **Лебедев Сергей Константинович**

**Ведущая организация**

ОАО «НИИ Электропривод», г. Иваново

Защита состоится «27» ноября 2009 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корп. Б, ауд. Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, автореферат размещен на сайте [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан «    » октября 2009 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**В.В. Тютиков**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Электромеханические системы (ЭМС) – электроприводы (ЭП) входят в состав технологического оборудования самого широкого спектра действия различных отраслей промышленности. Управление ЭП является эффективным способом регулирования механических и технологических переменных промышленных установок.

Повышение требований к качеству управления ЭМС становится причиной использования при проектировании управляющих устройств (УУ) более детальных математических моделей объектов, которые учитывают, в частности, упругие свойства кинематических передач.

Кроме типовых, существуют более совершенные средства управления – регуляторы состояния (РС), позволяющие значительно расширить возможности проектируемых динамических систем.

Важной особенностью рабочих режимов различного технологического оборудования являются возникающие в процессе работы механические перегрузки, при которых должно обеспечиваться автоматическое ограничение тока (момента) двигателя максимально допустимым значением.

Если опасные перегрузки возникают редко, то система ограничения тока (момента) может функционировать как защитное устройство, полностью отключающее ЭП и вызывающее перерыв в работе механизма.

Однако любой технологический процесс, связанный с производством материалов и изделий, стремятся согласно экономической целесообразности сделать непрерывным. Примерами таких технологических комплексов являются бумаго- и картоноделательные машины, непрерывные станы холодной прокатки, конвейерные линии многих производств, а также технологические агрегаты циклического действия: подъемно-транспортные машины, экскаваторы, металлообрабатывающие станки, промышленные манипуляторы.

Для таких технологических комплексов должно предусматриваться автоматическое ограничение координат, не вызывающее перерывов в технологическом процессе, которые могли бы снизить производительность системы.

В отличие от каскадного, модального управления (МУ) позволяет достичь требуемого качества регулирования для систем высокого порядка в линейной области их работы. Между тем при больших отклонениях координат от заданных в системах МУ не предусмотрены способы ограничения переменных, которые в переходных процессах могут превысить максимально допустимые значения. Таким образом, динамические свойства системы, полученные «в малом» с помощью более совершенного алгоритма управления, теряются «в большом».

Известны классические способы ограничения координат, которые, на первый взгляд, должны быть совместимы со структурой системы модального управления. К ним относятся задатчики темпа изменения входного сигнала, нелинейные обратные связи типа отсечек по ограничиваемым переменным, а

также упреждающее токоограничение (УТО). Эффективность применения указанных элементов защиты подтверждается для ЭМС низкого порядка с жесткими кинематическими связями между валом двигателя и исполнительным органом. Однако перенос их в неизменном виде на электромеханические системы с упругими связями (упругомассовые ЭМС) уже не гарантирует получения желаемых результатов и высокого качества управления.

Разработка нового технологического оборудования проводится, как правило, на основе систем автоматизированных ЭП переменного тока, ЭП постоянного тока здесь составляет лишь незначительную часть. В то же время в технологическом оборудовании, находящемся в эксплуатации, наблюдается иная ситуация. В базовых отраслях промышленности, таких как металлургическая, машиностроительная, целлюлозно-бумажная, действующее оборудование оснащено преимущественно регулируемым ЭП постоянного тока. При модернизации подобных систем возможен как полный переход от двигателей постоянного тока к двигателям переменного тока, так и частичное совершенствование оборудования, но с сохранением в нем в качестве управляемых элементов электроприводов постоянного тока.

Таким образом, в настоящее время для упругомассовых ЭМС, построенных по принципам модального управления и включающих в себя двигатели как постоянного, так и переменного тока, отсутствуют эффективные способы автоматического ограничения переменных в переходных процессах.

**Целью** работы является разработка и реализация эффективных методов управления упругомассовыми электромеханическими системами повышенной сложности при значительных изменениях режимов функционирования, связанных с переходами из линейной области «малых» в нелинейную зону «больших» отклонений координат состояния, обусловленных ограниченными возможностями силовых исполнительных устройств.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1) анализ проблем и возможностей управления упругомассовыми ЭМС в областях «малых» и «больших» изменений координат состояния с использованием известных технических решений;

2) исследование особенностей управления нелинейными ЭМС повышенной степени сложности в режимах ограничения тока (момента) силовых исполнительных устройств;

3) разработка и исследование эффективных методов формирования переходных процессов статических и астатических ЭМС длительного и повторно-кратковременного режимов работы в условиях ограничения тока силовой цепи;

4) исследование особенностей применения методов ограничения координат состояния ЭМС постоянного и переменного тока с учетом влияния явных и скрытых факторов сложности;

5) практическая реализация разработанных методов и средств управления упругомассовыми ЭМС ограниченной мощности.

**Связь с целевыми программами.** Полученные результаты исследований и разработанные способы токоограничения нашли отражение в следующих целевых программах.

1. Федеральная целевая научно-техническая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы, тема «Развитие теории робастного управления электроэнергетическими и электротехническими системами для повышения эффективности функционирования».

2. Аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)». Подраздел № 2.1.2. «Проведение фундаментальных исследований в области технических наук», тема «Разработка теории робастного модального управления для решения задач автоматизации технологических объектов».

**Методы исследований.** При решении поставленных задач в работе использованы методы пространства состояний и модального управления, аппарат теории матриц и передаточных функций (ПФ), методы частотной коррекции систем автоматического управления (САУ) и гармонической линеаризации нелинейностей. Проведение исследований синтезированных систем управления выполнялось методом имитационного моделирования.

**Научная новизна работы** определяется разработкой и реализацией новых подходов к решению проблемы формирования переходных процессов «в большом» для упругомассовых ЭМС, построенных на базе регуляторов состояния различного типа:

1) установлены основные закономерности влияния темпа изменения скорости и величины нагрузочного момента упругомассовых ЭМС, содержащих задатчик интенсивности (ЗИ) и узел токоограничения, на колебательность процессов стабилизации тока силовой цепи, обусловленные особенностями влияния тока на эквивалентный коэффициент передачи нелинейного элемента в контуре токоограничения;

2) выявлены существенные ограничения возможностей классических и компенсационных полиномиальных регуляторов (ПР) «входа-выхода», синтезированных методами модального управления, в достижении высокودинамичных процессов стабилизации тока (момента) электродвигателей при сохранении робастных свойств создаваемых ЭМС;

3) разработана методика эффективной частотной коррекции контуров токоограничения статических упругомассовых ЭМС постоянного и переменного тока с различными типами регуляторов состояния на основе использования компенсационных корректирующих устройств пониженного порядка и типовых ПИ- и ИД- звеньев в условиях относительно стабильных и существенно меняющихся параметров системы;

4) разработан комплекс методов решения проблемы токоограничения астатических ЭМС, основанных на применении корректирующих устройств с размерностью, соответствующей степени астатизма, логических переключе-

чающих устройств, интегрирующих звеньев с синхронным изменением накопленной информации и структурных объединений каналов токовой отсечки (ТО) и основного регулятора;

5) предложено эффективное решение задачи высокочастотного токоограничения для ЭМС, работающих в напряженных повторно-кратковременных режимах, основанное на комбинации скорректированного канала токовой отсечки с дополнительным каналом упреждающего токоограничения.

**Практическая ценность работы** состоит:

1) в разработке рекомендаций по выбору типов и расчету параметров корректирующих звеньев в каналах токоограничения различных видов ЭМС, а также по настройке комбинированных систем, содержащих каналы токовой отсечки и упреждающего токоограничения;

2) в возможности применения разработанных систем для управления электроприводами постоянного и переменного тока различных технологических машин, функционирующих как в длительном, так и повторно-кратковременном режимах работы;

3) в разработке вычислительных моделей ЭМС повышенной степени сложности, позволяющих проводить их всесторонние компьютерные исследования на ранних стадиях проектирования.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертационной работы, касающиеся разработанного метода ограничения переменных, использованы при построении системы управления «Интеграл» металлорежущего координатно-сверлильного станка. Система реализована на *IBM*-совместимом компьютере и многоосевом контроллере движения, выполняющем функции цифрового управления электроприводами, построенными на базе асинхронных двигателей типа АИР и *IGBT*-модулей фирмы *Mitsubishi Electric*. Результаты приняты к внедрению в ОАО «Орелтекмаш» (г. Орел). Полученные результаты нашли также применение в учебном и научно-исследовательском процессах кафедры «Электроники и микропроцессорных систем» ИГЭУ. На их основе разработаны программы и составлены варианты комплексной лабораторной и расчетно-графической работ. Эти материалы используются при подготовке бакалавров по направлению 220200 «Автоматизация и управление» и инженеров по специальности 210106 «Промышленная электроника» в курсе «Теория нелинейных и дискретных систем управления», а также магистров направления 220200 «Автоматизация и управление» в курсе «Современные проблемы автоматизации и управления».

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и получили положительную оценку на Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии XIII – XV Бенардосовские чтения» (Иваново, 2005 г., 2007 г., 2009 г.); Пятой Международной конференции по автоматизированному электроприводу (Санкт-Петербург, 2007 г.); Четырнадцатой Международной научно-технической

конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2008 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень периодических научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства образования России.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 112 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 150 листах машинописного текста и содержит 105 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ возможностей управления упругомассовыми ЭМС при отработке ими задающих и возмущающих воздействий с помощью систем подчиненного регулирования координат и на основе использования регуляторов и наблюдателей состояния.

Показано, что в условиях повышения технологических требований (к производительности машин, качеству выпускаемой продукции и т.п.) современные электромеханические системы, являющиеся важной составной частью производственного оборудования, проявляют себя как сложные динамические объекты с большим количеством инерционностей, взаимосвязями переменных, наличием резонансных зон и т.п., создающих значительные

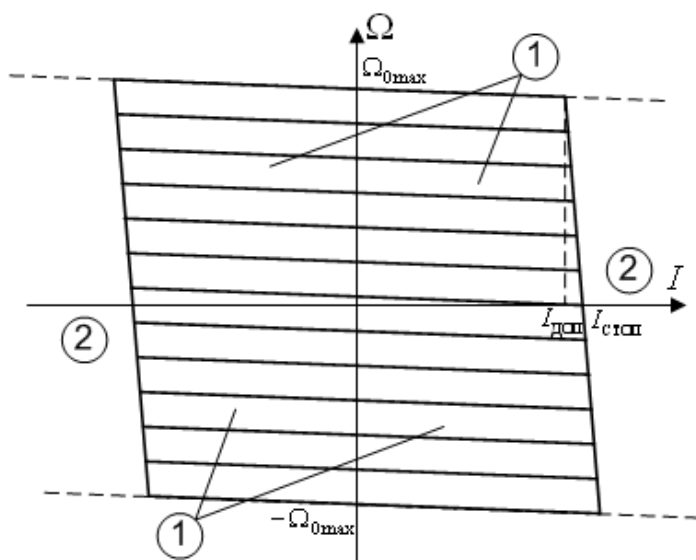


Рис. 1.

трудности для управления изменением координат как в линейной области «малых» (рис. 1, область «1»), так и в нелинейной зоне «больших» (рис. 1, область «2») отклонений, обусловленной ограниченными возможностями силовых исполнительных элементов (преобразователей энергии, электродвигателей, кинематических звеньев).

В области «1» осуществляется регулирование скорости электропривода или положения исполнительного механизма.

Здесь с помощью различных структур модальных регуляторов обеспечивается достижение необходимого статизма или получение абсолютно жесткой

характеристики при введении интегратора в закон управления, а также осуществляется выполнение заданных динамических требований. Напротив, в области «2» осуществляется регулирование тока или момента ЭМС в режиме ограничения этих переменных при выходе из линейной зоны. В этой области требуется стабилизация развиваемого двигателем момента при значительных изменениях скорости вследствие воздействия на систему перегрузочных моментов сопротивления.

Электромеханические системы, строящиеся по принципу подчиненного регулирования координат на базе типовых каскадных регуляторов пониженного порядка с ограничениями выходных сигналов, оказываются эффективными в управлении скоростными режимами механизмов с жесткими кинематическими передачами при работе на обоих участках характеристики, но теряют свои преимущества, а во многих случаях и работоспособность при наличии упругих элементов механической части, существенно повышающих степень сложности всего управляемого объекта.

Управление упругомассовыми электромеханическими системами с использованием различных типов безынерционных и динамических регуляторов состояния позволяет выполнить комплекс сложных технических требований в линейной зоне «малых» отклонений координат (область «1»), но не имеет возможностей их эффективного ограничения в области «больших» отклонений (область «2»), как и реализации плавных переходов из одной области фазового пространства в другую.

Известные технические решения в виде задатчиков интенсивности, ограничителей выходных сигналов регуляторов, контуров задержанных обратных связей (отсечек), каналов предупреждающего токоограничения ни в своих отдельных применениях, ни в комбинациях не позволяют реализовать эффективную стабилизацию тока (момента) электродвигательных устройств в режимах обработки «больших» изменений управляющего воздействия и вариаций нагрузочного момента упругомассовых электромеханических систем из-за ограниченных возможностей управления по сравнению с различными типами регуляторов состояния, функционирующих в линейной зоне регулирования скорости (положения) рабочего органа.

Это обуславливает необходимость существенной модернизации известных и поиска новых структурных решений, способных обеспечить эффективную работу электромеханических систем при изменениях режимов их функционирования в условиях ограниченной мощности силовых исполнительных устройств.

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей управления ЭМС в режимах ограничения тока силовых исполнительных устройств с использованием задатчика интенсивности и канала токоограничения.

Выявлено, что при формировании процессов ограничения тока (момента) электродвигателя в комбинированных упругомассовых ЭМС, построен-



ных с использованием ЗИ и узла токовой отсечки (рис. 2), наблюдается существенное повышение колебательности (рис. 3) в условиях снижения нагрузочного момента  $M_C$  и темпа «разгона» системы, обусловленное специфической влиянием тока на эквивалентный коэффициент передачи нелинейного элемента типа «зона нечувствительности» в контуре токоограничения.

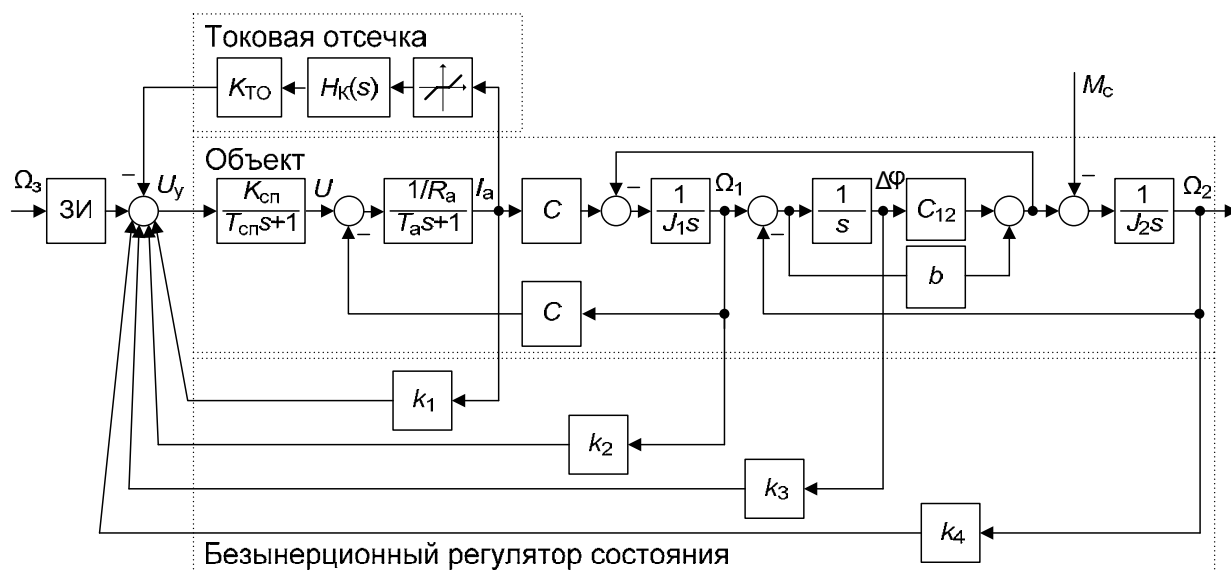


Рис. 2.

$\Omega_3$  – заданное значение скорости;  $U_y$ ,  $U$  – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя;  $I_a$  – ток якорной цепи электродвигателя;  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  и  $\Delta\Phi$  – угловые скорости и разность угловых перемещений валов электродвигателя и рабочего органа;  $M_C$  – момент нагрузки (статического сопротивления),  $K_{сп}$  и  $T_{сп}$  – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя напряжения,  $R_a$  и  $T_a$  – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи,  $C$  – конструктивная постоянная двигателя,  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции ротора двигателя и рабочего органа соответственно,  $C_{12}$  и  $b$  – приведенный коэффициент жесткости и коэффициент внутреннего вязкого трения кинематической передачи,  $k_1 \dots k_4$  – коэффициенты регулятора,  $K_{ТО}$  и  $H_k(s)$  – добавочный коэффициент усиления и ПФ корректирующего звена в контуре ТО.

Наглядное представление выявленных закономерностей позволяет получить метод гармонической линеаризации нелинейности (рис. 4) с характеристикой

$$H(a_I, I_0) = -\frac{1}{q(a_I, I_0)}, \text{ где } q(a_I, I_0) \text{ – коэффициент гармонической}$$

линеаризации нелинейного элемента (НЭ) типа «зона нечувствительности»

$$q(a_I, I_0) = 1 - \frac{1}{\pi} \left( \arcsin \frac{I_d - I_0}{a_I} + \arcsin \frac{I_d + I_0}{a_I} + \frac{I_d - I_0}{a_I} \sqrt{1 - \frac{(I_d - I_0)^2}{a_I^2}} + \frac{I_d + I_0}{a_I} \sqrt{1 - \frac{(I_d + I_0)^2}{a_I^2}} \right),$$

$a_I \geq I_d + |I_0|$  – амплитуда первой гармоники колебаний тока на входе НЭ,

$I_d$  – предельно допустимое значение тока ЭД,  $I_0$  – значение тока смещения, действующего на входе НЭ и обусловленного присутствием на валу рабочего органа нагрузочного момента.

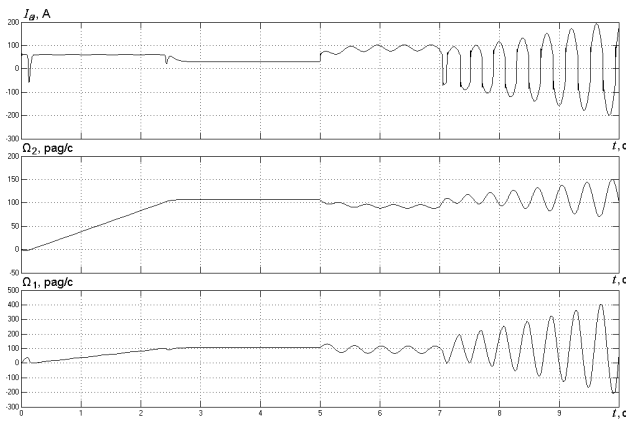


Рис. 3

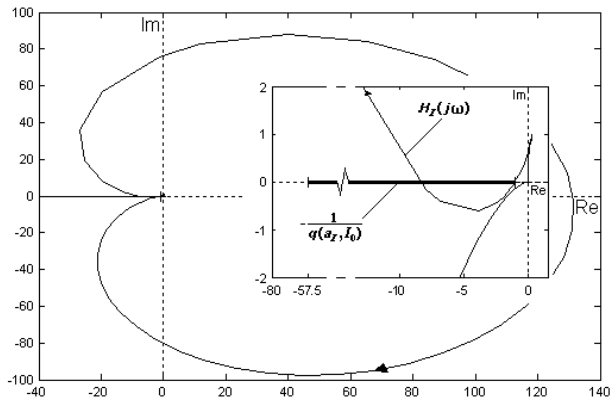


Рис. 4

Установлено, что определенное улучшение динамики упругомассовой ЭМС может быть достигнуто повышением коэффициента усиления  $K_{ТО}$  в канале токоограничения, позволяющим исключить пересечение частотных характеристик линейной части и нелинейного элемента, однако эффективность такого решения при работе системы с малыми моментами нагрузки оказывается недостаточной.

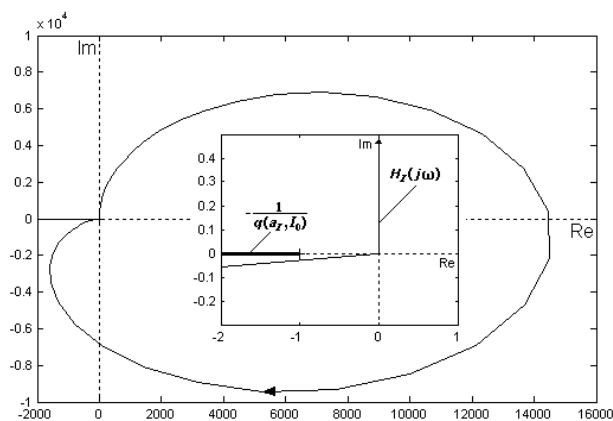


Рис. 5

характеристики «жесткой» системы (рис. 5).

Видоизменение ПФ линейной части упругомассовой ЭМС относительно выхода-входа нелинейного элемента в контуре токоограничения

$$H_1(s) = \frac{I(s)}{U_y(s)} = \frac{B_1(s)}{D(s)} = \frac{b_{13}s^3 + b_{12}s^2 + b_{11}s}{s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0},$$

подавление работы основного регулятора скорости и обеспечение высокочастотных процессов стабилизации тока на основе использования классического полиномиального регулятора оказывается затруднительным.

Наличие неблагоприятных нулей в ПФ исходной системы  $H_1(s)$  приводит к тому, что результатом синтеза полиномиального регулятора оказывается неминимально-фазовое (или даже неустойчивое) динамическое звено, не способное обеспечить робастные свойства создаваемой системы.

Использование в контуре токоограничения компенсационных ПР типа

$$H_K(s) = \frac{R_I(s)}{C_I(s)} = \frac{r_{13}s^3 + r_{12}s^2 + r_{11}s + r_{10}}{s(c_{11}s + c_{10})}, H_K(s) = \frac{R_I(s)}{C_I(s)} = \frac{r_{13}s^3 + r_{12}s^2 + r_{11}s + r_{10}}{c_{10}(s^2 + b_{11}s + b_{10})},$$

$$H_K(s) = \frac{R_I(s)}{C_I(s)} = \frac{r_{13}s^3 + r_{12}s^2 + r_{11}s + r_{10}}{s(s^2 + b_{11}s + b_{10})},$$

обеспечивающих сокращение устойчивых нулей исходной передаточной функции («нулевого нуля», комплексно-сопряженных нулей и всего числителя ПФ  $H_I(s)$  соответственно), не является эффективным, поскольку порождает новые проблемы параметрической чувствительности системы, изменения уровня ее выходной координаты в различных режимах работы и приводит к существенному усложнению ПФ управляющего устройства.

Это требует поиска иных решений для формирования переходных процессов ЭМС в режимах ограничения тока силовой цепи.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы формирования переходных процессов статических и астатических ЭМС в режимах ограничения тока силовой цепи с помощью компенсационного регулятора и с применением частотной коррекции контура ТО.

Показано, что компенсационные регуляторы пониженного порядка вида

$$H_K(s) = \frac{(s + \Omega_0)^2}{s^2 + b_{i1}s + b_{i0}},$$

синтезированные для контуров токовой отсечки исходя из условий подобия передаточных функций упругомассовой

$$H_I(s) = \frac{s(s^2 + b_{i1}s + b_{i0})}{(s + \Omega_0)^4} \text{ и «жесткой» } H_{I_{ж}}(s) = \frac{b_{i1_{ж}}s}{(s + \Omega_{0_{ж}})^2}$$

систем, являются достаточно эффективным и универсальным средством токоограничения для ЭМС с относительно стабильными параметрами, не претерпевающими больших изменений в процессе эксплуатации (рис. 6, рис. 7).

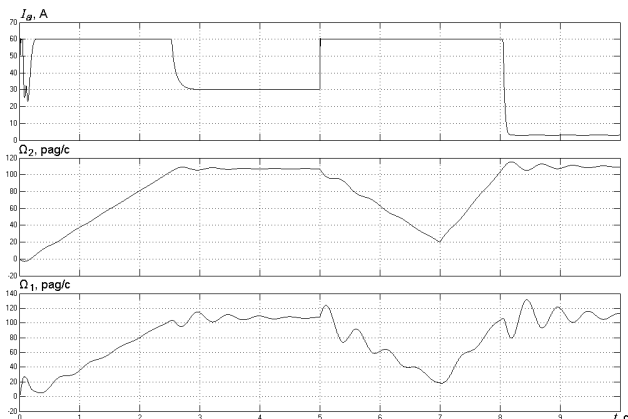


Рис. 6

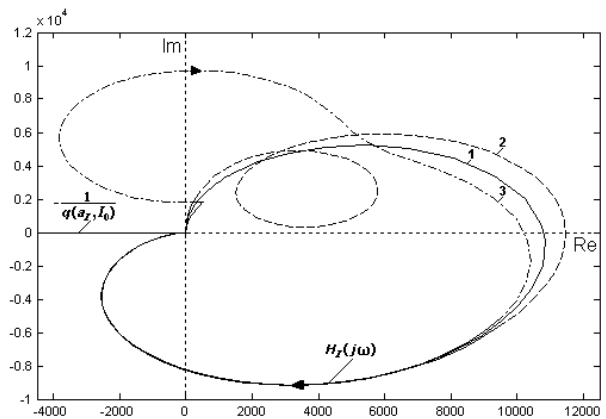


Рис. 7

На рис. 7 приняты следующие обозначения кривая 1 – АФЧХ линейной части контура ТО исходной системы, кривые 2 и 3 – АФЧХ линейной части контура ТО при изменении  $C_{12}$  в диапазоне  $\pm 30\%$  соответственно.

Для упругомассовых ЭМС с существенно меняющимися внутренними параметрами более рациональным решением задачи токоограничения является использование редуцированных пропорционально-интегральных (ПИ) и интегро-дифференцирующих (ИД) устройств (рис 8; рис. 9, где приняты те же обозначения, что на рис. 7), синтезированных путем классической частотной коррекции с применением метода гармонической линеаризации нелинейностей.

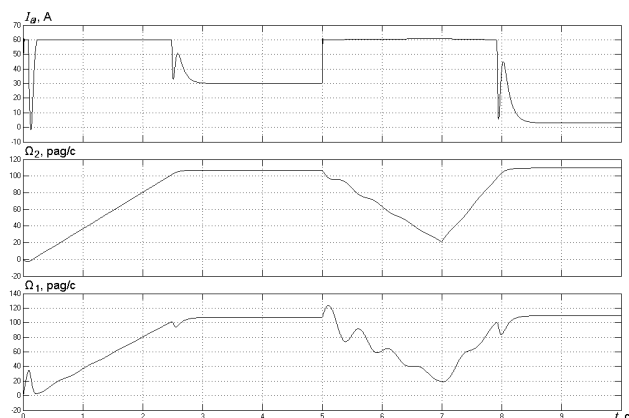


Рис. 8

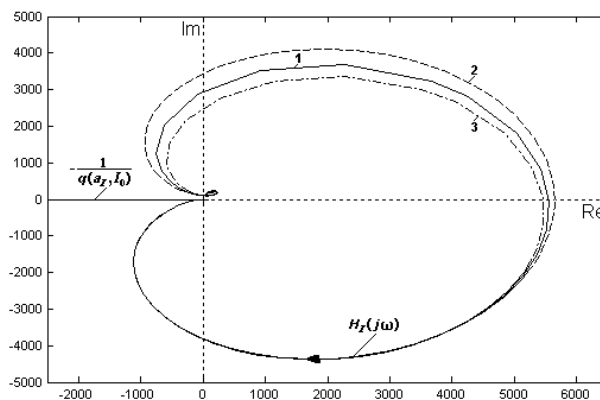


Рис. 9

Для улучшения качества переходных процессов астатических упругомассовых ЭМС при наличии режимов токоограничения необходимо обеспечить повышение порядка корректирующих устройств каналов токовой отсечки в соответствии с заданной степенью астатизма и решать проблему паразитного накопления информации интегрирующими звеньями основного регулятора на интервалах токоограничения (проблему «противонакопления» интеграторов).

Возможными способами решения проблемы токоограничения астатических ЭМС являются следующие.

Применение логических переключающих устройств (рис. 10), блокирующих работу интеграторов основного регулятора путем размыкания цепи на его входе на интервалах токоограничения. Использование в основном регуляторе и корректирующем устройстве контура ТО интегрирующих звеньев с синхронным «сбросом» информации (рис. 11). При этом следует осуществлять периодический сброс накопленной интегратором контура токоограничения с ПФ  $H(s) = 1/\tau s$  информации по достижении ею какого-то определенного значения «числа сброса», а из сигнала, накопленного интегратором главного контура с ПФ  $H(s) = k_s/s$ , вычитать ту же самую величину «число сброса». Подобные периодические сбросы никаким образом не отразятся на качестве работы системы в режиме источника скорости, но значительно

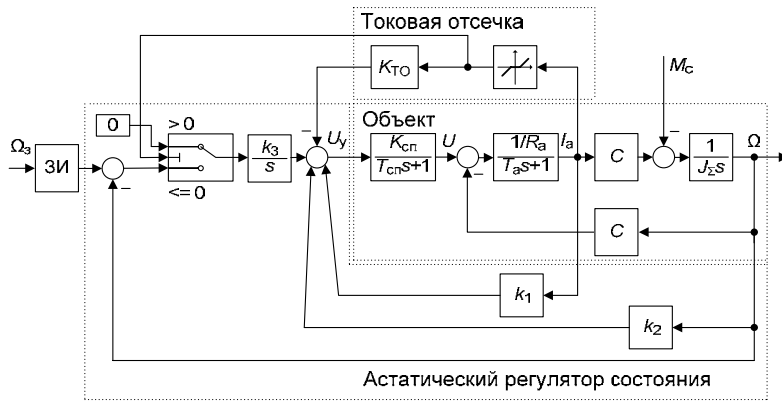


Рис. 10

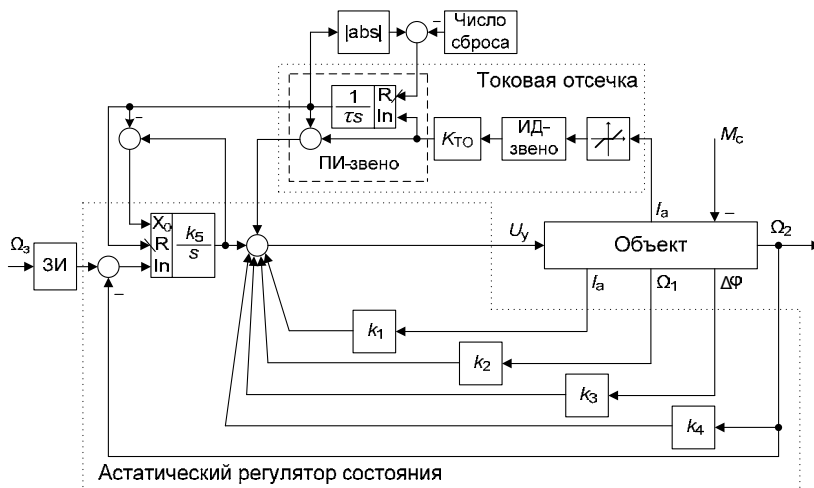


Рис. 11

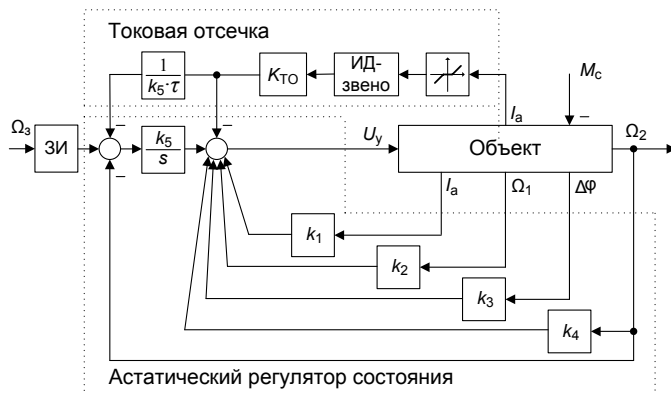


Рис. 12

улучшат ее характеристики при работе в режиме источника тока. Третий способ – выполнение эквивалентных структурных преобразований (рис. 12) с целью переноса задержанной обратной связи по току, содержащей интегрирующий элемент, со входа силового преобразователя объекта на вход астатической составляющей регулятора состояния. Указанное преобразование позволяет совместить в одном блоке интегральные части основного регулятора и регулятора контура ТО. При этом сохраняются характер и качество переходных процессов по рассматриваемым координатам состояния.

Универсальный характер предложенных технических решений подтверждается

возможностью их использования в ЭМС с различными типами безынерционных и динамических регуляторов состояния.

**Глава четвертая** посвящена рассмотрению особенностей применения методов токоограничения в различных типах электромеханических систем, таких как ЭМС с упругостями I и II рода; ЭМС, работающих в напряженном повторно-кратковременном режиме, а также в системах переменного тока с векторным управлением переменными.

Непрерывные технологические линии применяются в различных отраслях промышленного производства. К ним относятся прокатные станы, бумагоделательные машины, поточные линии химической и текстильной промышленности и т.п. В решении комплексной задачи автоматического управления широко распространенным технологическим объектом (рис. 13) повышенной сложности в виде двухдвигательной ЭМС с упругими звеньями I и II рода, являющимся типовым фрагментом технологической установки, высо-

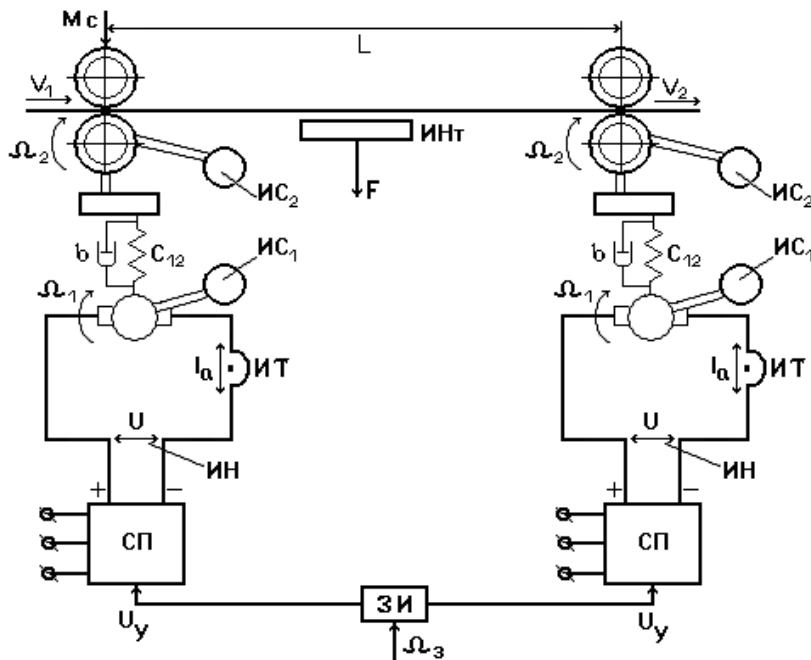


Рис. 13

кий технический результат может быть достигнут путем органичного сочетания известных методов модального управления и подчиненного регулирования координат с разработанными методами частотной коррекции контуров токоограничения.

При этом методы ограничения тока (момента) должны рассматриваться не как альтернатива, а как эффективное дополне-

ние известным методам управления, обеспечивающим более полный учет особенностей объекта, при выполнении заданных требований и достижении поставленных задач.

Для управления электроприводами механизмов с напряженным повторно-кратковременным режимом работы и высокой частотой повторений разгонов, торможений и реверсов использование задатчиков интенсивности переходных процессов становится нерациональным, поскольку приводит к существенной потере производительности при работе с различными по величине моментами нагрузки.

В этих условиях основным средством ограничения тока (рис. 14) на низких и средних частотах может служить контур токовой «отсечки», содержащий интегро-дифференцирующие корректирующие звенья, а для снижения высокочастотных флуктуаций тока целесообразно введение дополнительных каналов упреждающего токоограничения, настраиваемых экспериментально подбором значения одного из параметров с контролем максимального значения тока в начальной фазе переходных процессов. К тому же, если рассматривать чувствительность предлагаемой структуры (рис. 14) к вариациям параметров объекта, то этот недостаток, присущий отдельно взятому

контуру УТО, в приведенной комбинированной системе становится несущественным.

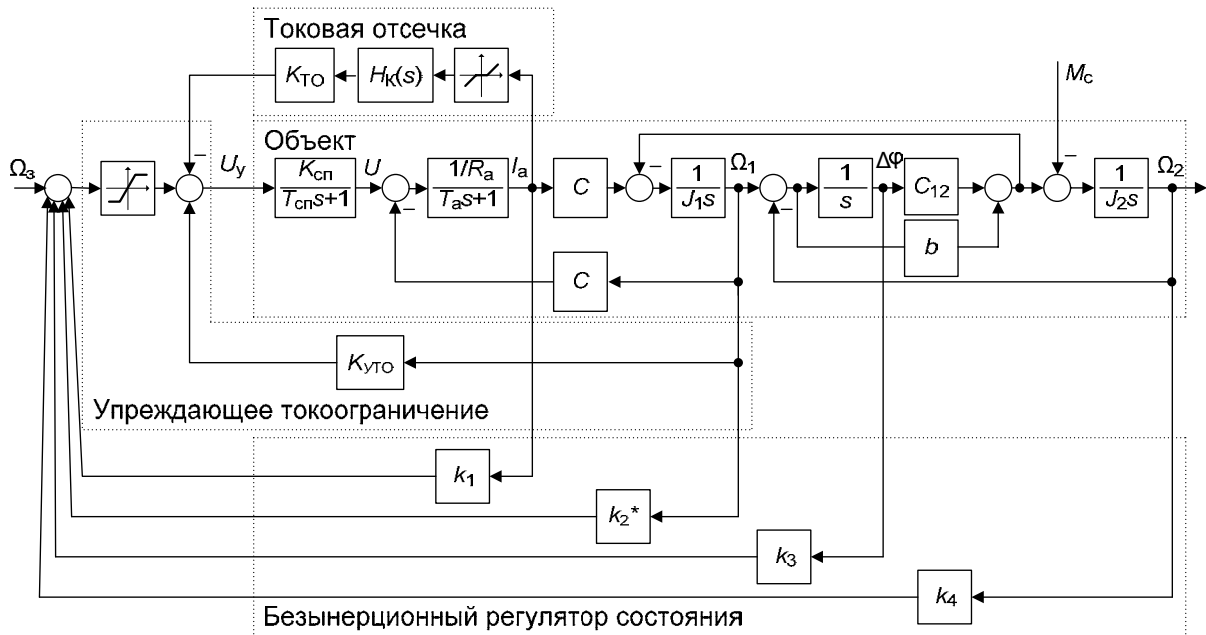


Рис. 14

Все приведенные выше результаты исследований были получены для систем ЭП с двигателем постоянного тока, обладающим хорошими регулировочными, но низкими эксплуатационными характеристиками. В настоящее время широко распространены ЭП с асинхронным двигателем, где осуществляется векторное управление его координатами. Структурная схема для ЭП большой мощности с векторным управлением при ориентации по вектору потокосцепления ротора упрощено может быть представлена в следующем виде (рис. 15). Она оказывается практически аналогичной структурной схеме, описывающей двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

В ЭП переменного тока малой и средней мощности, питающихся от преобразователей частоты, быстродействие которых значительно выше

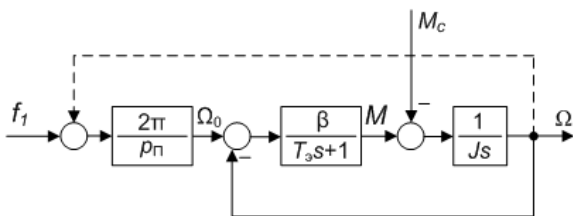


Рис. 15

инерционности электромагнитной цепи машины, часто применяют прямую компенсацию ЭДС вращения (пунктирная линия на рис. 15), что позволяет достичь предельно допустимого быстродействия в контуре при управлении моментом. При такой настройке динамика процессов в контуре момента не

влияет на механическую часть системы и последующие внешние, более медленные контуры управления скоростью и положением. В силу этого контур момента можно представить безынерционным звеном (рис. 16).

В этом случае разработанные методы ограничения электрических и механических координат могут эффективно использоваться и в системах на

базе асинхронных двигателей с векторным управлением переменными для решения задач стабилизации электромагнитных моментов машин и механических моментов механических передач.

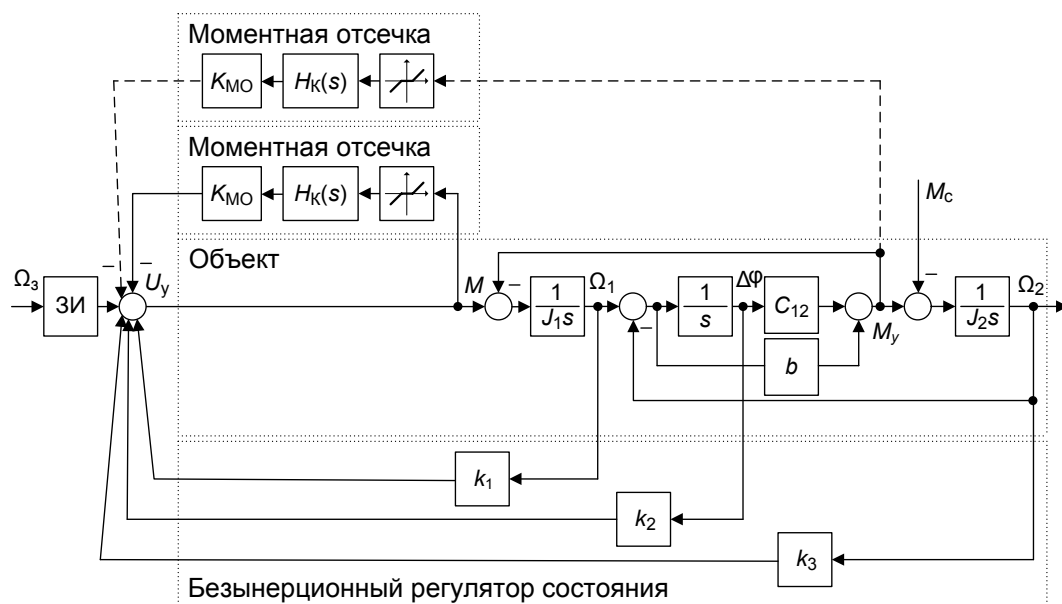


Рис. 16

Эффективность и практическая ценность разработанных методов и полученных технических решений подтверждается их успешным использованием в задачах синтеза и проектирования различных вариантов и типов ЭМС, а также их промышленным применением в цифровых системах управления электроприводах металлорежущих станков.

**В приложениях** приведены расчетные модели динамических систем в среде *Simulink* программного комплекса *MATLAB*, акты внедрения результатов работы в учебный процесс и промышленное производство.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Современные электромеханические системы, являющиеся важной частью производственного оборудования, в условиях повышения технологических требований к производительности машин, качеству продукции и т.п. должны рассматриваться как сложные динамические объекты с большим количеством инерционностей, наличием взаимосвязей переменных, резонансных зон и т.п., которые следует учитывать при управлении координатами состояния как в линейной области «малых», так и в нелинейной зоне «больших» отклонений, обусловленной ограниченными возможностями силовых элементов (преобразователей энергии, электродвигателей, кинематических звеньев).

2. Применение различных типов безынерционных и динамических регуляторов состояния, синтезированных усовершенствованными модальными



методами, позволяет выполнить комплекс сложных технических требований в линейной области «малых» отклонений координат, но не может обеспечить их эффективного ограничения в зоне «больших» отклонений, а также реализацию плавных переходов из одной области фазового пространства в другую при изменении режимов работы упругомассовых систем.

3. Традиционные технические решения, основанные на использовании задатчиков интенсивности, ограничителей выходных сигналов регуляторов, контуров задержанных обратных связей (отсечек), каналов предупреждающего токоограничения и др., ни в своих отдельных применениях, ни в комбинациях не позволяют реализовать эффективную стабилизацию тока (момента) электродвигателя в режимах обработки «больших» изменений задающего воздействия и вариаций нагрузочного момента упругомассовых систем из-за ограниченных возможностей такого управления.

4. Исследование особенностей управления электромеханическими системами в режимах ограничения тока (момента) силовых исполнительных устройств с использованием метода гармонической линеаризации нелинейности показывает, что рациональным путем улучшения динамики упругомассовой системы является приближение АФЧХ ее линейной части относительно выхода-входа нелинейного элемента в контуре токоограничения к виду аналогичной характеристики соответствующей «жесткой» системы.

5. Наличие неблагоприятных нулей в передаточной функции линейной части исходной упругомассовой системы приводит к тому, что необходимое видоизменение ее АФЧХ и обеспечение высокодинамичных процессов стабилизации тока (момента) с сохранением робастных свойств создаваемой системы на основе использования классического полиномиального «вход-выходного» регулятора оказывается затруднительным.

Использование в контуре токоограничения компенсационных полиномиальных регуляторов, обеспечивающих полное сокращение устойчивых нулей исходной передаточной функции, обостряет проблему параметрической чувствительности системы, вызывает изменения выходной координаты при смене режима работы и приводит к существенному усложнению управляющего устройства.

6. Компенсационные регуляторы пониженного порядка, синтезированные для контуров токовой отсечки исходя из условий подобия передаточных функций упругомассовой и соответствующей «жесткой» систем, являются эффективным и универсальным средством токоограничения при относительно стабильных параметрах объекта.

При существенном изменении параметров более рациональным является использование редуцированных пропорционально-интегральных и интегро-дифференцирующих устройств, синтезированных путем классической частотной коррекции с применением метода гармонической линеаризации нелинейностей.

7. Улучшение динамики астатических упругомассовых систем при наличии режимов ограничения тока (момента) обеспечивается повышением порядка корректирующих устройств каналов токовой отсечки в соответствии с заданной степенью астатизма, применением логических переключателей, блокирующих работу интеграторов основного регулятора на интервалах токоограничения; использованием в основном регуляторе и корректирующем устройстве интеграторов с синхронным «сбросом» информации, а также объединением интегрирующих звеньев канала токоограничения с интеграторами основного регулятора.

8. Для управления электроприводами механизмов с напряженным повторно-кратковременным режимом работы, когда использование задатчиков интенсивности переходных процессов становится нерациональным, основным средством ограничения тока на низких и средних частотах может служить контур токовой «отсечки», содержащий интегро-дифференцирующие корректирующие звенья, а для снижения высокочастотных флуктуаций тока целесообразно введение дополнительных каналов упреждающего токоограничения, подстраиваемых экспериментально вариацией одного параметра.

9. Эффективность, универсальность и практическая ценность полученных технических решений подтверждается их успешным использованием в задачах синтеза и проектирования различных типов электромеханических систем постоянного и переменного тока, а также их промышленным применением в цифровых системах управления электроприводами металлорежущих станков.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Копылова Л.Г. Ограничение тока электродвигателя в электромеханических системах с регуляторами состояния / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2006. – Вып. 3. – С. 34-42.

2. Копылова Л.Г. Особенности синтеза контура токовой отсечки в астатических электромеханических системах / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2008. – Вып. 4. – С. 30-37.

3. Копылова Л.Г. Синтез управляемых электромеханических систем с учетом факторов сложности / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2004. – Вып. 3. – С. 137-138.

4. Тарарыкин С.В. Особенности управления состоянием электромеханических систем при ограниченной мощности исполнительных устройств / С.В. Тарарыкин, Л.Г. Копылова, В.В. Тютиков // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – М.: Изд-во «Новые технологии», 2007. – № 6. – С. 11-16.

5. Тарарыкин С.В. Формирование переходных процессов электропривода путем частотной коррекции контура токоограничения / С.В. Тарарыкин,

В.В. Тютиков, Л.Г. Копылова // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2007. – Вып. 3. – С. 44-50.

**в прочих изданиях:**

6. Копылова Л.Г. Модальное управление электромеханическими системами с упругими звеньями I-го и II-го рода / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии. XIII Бенардосовские чтения». – Иваново, 2005. – С. 20.

7. Копылова Л.Г. Ограничение координат при модальном управлении электромеханическими системами / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Тезисы докладов XIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М., 2008. – С. 110-111.

8. Копылова Л.Г. Особенности управления электромеханическими системами с упругостями I и II рода / Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии. XV Бенардосовские чтения». – Иваново, 2009. – С. 265-267.

9. Копылова Л.Г. Управление электромеханическими системами с учетом ограничения координат состояния / Л.Г. Копылова, Н.Г. Князева, С.В. Тарарыкин // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии. XIV Бенардосовские чтения». – Иваново, 2007. – С. 8.

10. Тарарыкин С.В. Формирование динамики электроприводов при ограничениях координат состояния / С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков, Л.Г. Копылова // Труды Пятой Международной конференции по автоматизированному электроприводу. – СПб., 2007. – С. 67-68.

**КОПЫЛОВА Лариса Геннадьевна**

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ  
С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

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

Подписано в печать 16 октября 2009. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ № ....

ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в РИО ИГЭУ