

На правах рукописи

ГНЕЗДОВ Николай Евгеньевич

**МНОГОСВЯЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И НЕЖЕСТКОЙ МЕХАНИКОЙ**

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  
Глазунов Виктор Федорович

Официальные оппоненты:                доктор технических наук, профессор  
Хватов Станислав Вячеславович  
доктор технических наук, профессор  
Голубев Александр Николаевич

Ведущая организация:                      ОАО «НИПТИЭМ», г. Владимир

Защита диссертации состоится “27” февраля 2009 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

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

Автореферат разослан “  ” января 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



В.В. Тютиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Решение важной государственной задачи удвоения ВВП невозможно без существенного повышения производительности труда. В решении этой задачи особая роль принадлежит автоматизированному электроприводу (ЭП), обеспечивающему преобразование электрической энергии в механическую и движение до 90% механизмов и машин в промышленности. Бурное развитие силовой электроники и микропроцессорных средств позволило реализовать сложные алгоритмы управления двигателями переменного тока. В результате асинхронный ЭП с векторным управлением стал доступным и широко используется при создании и модернизации систем ЭП, в том числе систем многосвязного ЭП, когда несколько ЭП приводят в движение одну рабочую машину (РМ).

При этом в условиях жестких требований к энергетике, быстродействию и полосе пропускания таких ЭП необходимо демпфировать колебания, вызванные нежесткостью кинематических связей. Эта проблема стала предметом исследований достаточно давно. В работах Ю.А. Борцова, Б.Ш. Бургина, Г.М. Иванова, Б.В. Квартального, В.И. Ключева, Г.Г. Соколовского, С.В. Тарарькина, В.М. Шестакова и других выполнены исследования взаимного влияния электрической и механической частей ЭП, предложены последовательная и параллельная коррекция систем подчиненного регулирования, а также синтез регуляторов состояния, обеспечивающих необходимое качество регулирования. Но в большинстве работ рассматриваются системы ЭП постоянного тока. В системах асинхронного многосвязного ЭП с векторным управлением и нежесткой механикой обеспечению монотонности переходных процессов скорости РМ и моментов в передачах при максимальном быстродействии, вариации моментов инерции двигателей и РМ, коэффициентов жесткости и вязкости кинематических связей, а также информационному обеспечению системы, в том числе в условиях действия внешних возмущений, уделено недостаточно внимания.

При этом остается также актуальной задача организации обмена большими объемами данных в режиме реального времени как между локальными ЭП многосвязной системы, так и с автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУТП), подсистемами верхнего уровня.

**Целью диссертационной работы** является разработка методик синтеза систем управления многосвязным асинхронным электроприводом с векторным управлением и нежесткой механикой, обеспечивающей свободный обмен информацией между элементами системы в условиях действия внешних возмущений.

В соответствии с указанной целью решены следующие задачи:

– выполнен анализ способов демпфирования механических колебаний в ЭП с упругими кинематическими связями;

– разработана математическая модель многосвязного асинхронного ЭП с нежесткой механикой с учетом особенностей векторного управления;

– разработаны структура и методика расчета параметров микропроцессорной системы управления скоростью РМ и моментами в передачах, обеспечивающие демпфирование их колебаний и ограничение моментов в передачах в условиях вариации параметров объекта;

– выполнен синтез наблюдателей состояния (НС) объекта, учитывающих действие на него внешних возмущений;

– создана и апробирована методика разработки средств коммуникации индивидуальных комплектных ЭП, проведены экспериментальные исследования созданных средств коммуникации.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач в работе использованы методы теории пространства состояний, модального управления, метод операционного исчисления, аппарат передаточных функций и структурных схем, методы имитационного моделирования и натурального эксперимента.

**Научная новизна работы** представлена:

– методом ограничения моментов, возникающих в кинематических связях асинхронного ЭП с векторным управлением и нежесткой механикой;

– аналитической зависимостью значения среднегеометрического корня характеристического уравнения разрабатываемой системы ЭП как от времени регулирования, так и от требуемой полосы пропускания;

– методикой синтеза системы асинхронного ЭП с векторным управлением и нелинейным РС переменной структуры, позволяющей рассчитывать параметры регулятора и НС при заданных параметрах нежесткой механики, уровне ограничения моментов и полосе пропускания системы ЭП;

– методикой синтеза НС с повышенным (вторым и более) порядком астатизма, позволяющих в условиях действия на объект управления внешних возмущений повысить точность восстановления как переменных объекта, так и возмущений.

**Практическую значимость** имеют следующие результаты работы:

– рекомендации по настройке РС, обеспечивающей сохранение монотонности переходных процессов и быстродействия системы при вариации параметров объекта;

– результаты исследования наблюдателей состояния полного порядка, а также астатических НС, в том числе с повышенным порядком астатизма, позволяющие дать рекомендации по использованию каждого типа наблюдателей в системах многосвязного ЭП с нежесткой механикой;

– методика разработки средств коммуникации, ориентированная на создание систем многосвязного асинхронного ЭП, свободно обменивающихся информацией в режиме реального времени как между индивидуальными

ЭП так и с вышестоящим уровнем управления при минимальных аппаратных затратах.

**На защиту выносятся** следующие результаты:

- структура, методика расчета и настройки параметров нелинейного РС переменной структуры многосвязного асинхронного ЭП с векторным управлением и нежесткой механикой;
- структуры, методики расчета и результаты исследований НС с астатизмом повышенного порядка;
- методика разработки средств коммуникации для индивидуальных комплектных ЭП в системе многосвязного ЭП.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Материалы диссертационной работы, касающиеся синтеза РС и НС, ограничения регулируемых переменных и обеспечения свободного информационного обмена между ЭП и другими устройствами, реализованные в преобразователях частоты марки ЭПВ, серийно выпускаемых ООО «ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода, приняты к внедрению в ГУП «Конструкторское бюро приборостроения» (г.Тула), а также внедрены в безредукторном ЭП лифта, разработанном совместно с ОАО «НИПТИЭМ» (г. Владимир), а также нашли применение в учебном и научно-исследовательском процессах на кафедре “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Ивановского государственного энергетического университета.

**Апробация работы.** Основные положения работы и её результаты докладывались и обсуждались на Межвузовских научно-технических конференциях «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности» (ПОИСК–2003 и ПОИСК–2004, Иваново, 2003 г. и 2004 г.); I Международной научно-технической конференции «Перспективы использования компьютерных технологий в текстильной и легкой промышленности» (ПИКТЕЛ–2003, Иваново, 2003 г.); Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XI, XII, XIV Бенардосовские чтения, Иваново, 2003 г., 2005 г., 2007 г.); Международной научно-технической конференции «Теория и инженерия металлургических процессов» (Краков, Польша, 2003 г.); Десятой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2004 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 1 доклад зарубежом (в Польше) и 6 статей в журналах, входящих в перечень периодических научных изданий, рекомендуемых ВАК Минобробразования России.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа включает введение, пять разделов, заключение, список использованной литературы и приложение. Она содержит 159 страниц основного текста, 92 рисунка, 5 таблиц,

список использованной литературы, включающий 109 наименований, и приложение на 32 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи диссертации, её научная новизна и практическая значимость.

**В первом разделе** определен класс объектов исследования, куда отнесены системы многосвязного асинхронного ЭП, имеющие в своем составе два и более комплектных ЭП, включающих двигатель и преобразователь частоты (ПЧ) с векторной системой управления и приводящих в движение через систему нежестких кинематических связей одну РМ. К таким объектам относятся опорно-поворотные устройства подъемно-транспортных механизмов и специальных установок, а также промышленные роботы.

На основе российских и международных стандартов, технических заданий на разработку систем ЭП рассматриваемого класса и особенностей объектов определены требования к системе управления, основным из которых является монотонность динамики не только скорости РМ, но и моментов в кинематических связях в условиях действующих ограничений и внешних возмущений, а также вариаций параметров механики (моментов инерции двигателей и РМ, жесткости и вязкости кинематических связей). При этом полоса пропускания по скорости РМ, ориентированной на микропроцессорную реализацию, должна иметь значение не менее 20 Герц. Обязательным в таком случае этапом проектирования системы ЭП должна быть разработка аппаратных средств и программных опций, выполняющих задачи обмена информацией, управления и автоматизации в режиме реального времени.

Предложена классификация и выполнен анализ способов демпфирования механических колебаний в ЭП. Установлено, что наиболее перспективной с точки зрения выполнения поставленных требований является структура с общим РС (рис. 1), получающим от НС информацию о координатах объекта, восстановленных с учетом действия на объект возмущений сложной формы. Для исключения влияния зазоров механических передач следует использовать систему создания распора, формирующую управляющие воздействия для каждого комплектного ЭП.

Для разработки требований и рекомендаций по проектированию средств коммуникации ЭП рассмотрено его место в структуре автоматизированной системы управления предприятием (АСУП) и задачи, стоящие перед ним как элементом этой структуры. Выполнен обзор и сравнительный анализ существующих средств коммуникации ЭП. В результате показана необходимость использования в системе ЭП открытой промышленной шины (*fieldbus*) и других средств коммуникации.

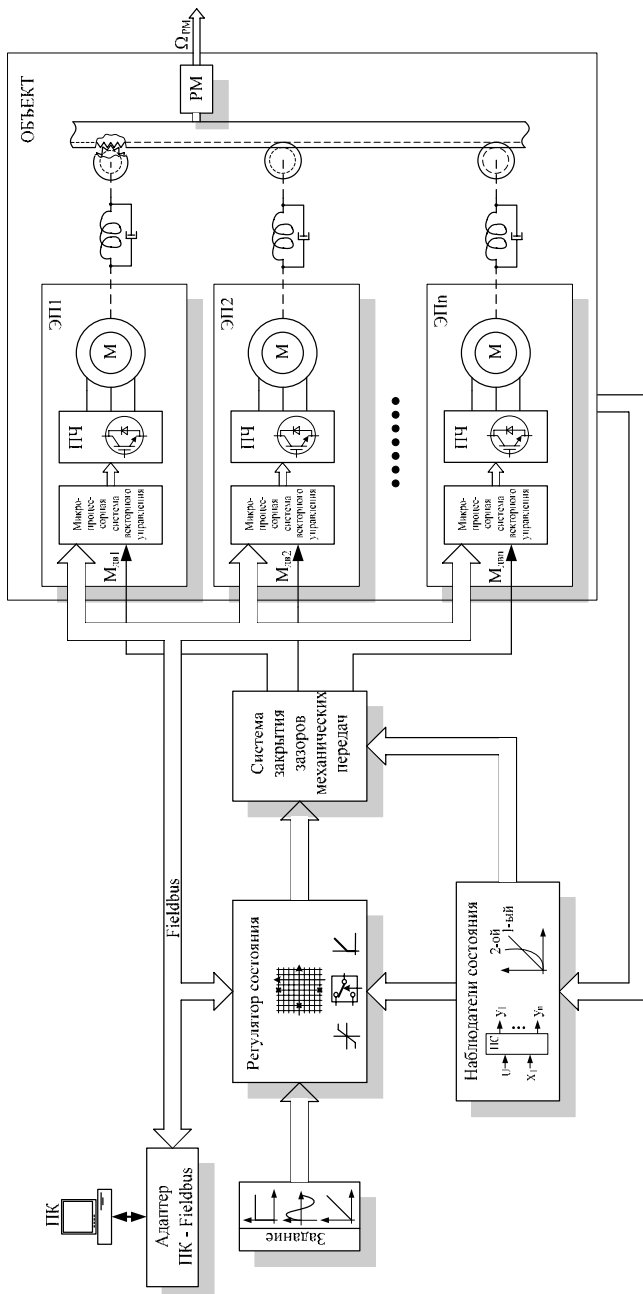


Рис. 1. Функциональная схема системы управления многоосевым асинхронным электроприводом объекта с жесткой механикой

**Второй раздел** посвящен разработке математической модели многосвязного асинхронного ЭП с векторным управлением и нежесткой механикой. Показано, что наличие в системе векторного управления с ориентацией тока статора по полю ротора блока компенсации перекрестных связей исключает взаимное влияние электрической и механической частей ЭП, что усиливает необходимость демпфирования упругих колебаний механической части средствами системы управления. С учетом общепринятых допущений и представления контура электромагнитного момента двигателя безынерционным динамическим звеном в результате эквивалентирования многомассовой системы разработана математическая модель объекта в виде двухмассовой вязкоупругой электромеханической системы (ЭМС). Адекватность полученной модели подтверждена имитационными и натурными экспериментами.

Для обеспечения максимального быстродействия разрабатываемой системы управления выполнен анализ связи между требованиями к её динамике и параметрами распределения в соответствии с биномом Ньютона корней её характеристического уравнения. В результате получены соотношения, позволяющие определять значение среднегеометрического корня  $\omega_{0r}$  по заданной полосе пропускания  $f_{np.3}$  системы ЭП в виде:

$$\omega_{0r} = \frac{2\pi f_{np.3}}{\sqrt{10^{3/10n} - 1}}; \quad \omega_{0r} = \frac{2\pi f_{np.3}}{tg(\pi/(2n))}, \quad (1)$$

где  $n$  - порядок полинома Ньютона.

Полученные соотношения позволяют выбирать  $\omega_{0r}$  при проектировании систем управления не по номограммам или экспертным оценкам разработчика, а точно рассчитывать, исходя из требований технического задания, а также корректно соотносить требования к динамике РС и НС.

**В третьем разделе** рассмотрена методика синтеза РС. Установлено, что принятый для синтеза объект полностью управляем и наблюдаем. Синтезирован РС двухмассовой вязкоупругой ЭМС (рис. 2), при этом коэффициенты регулятора получены в виде:

$$k_1 = \frac{3J_1J_2\omega_{0r} - b(J_1 + J_2)}{J_2}; \quad k_2 = \frac{-bJ_1J_2\omega_{0r}^3 + 3cJ_1J_2\omega_{0r}^2 - c^2(J_1 + J_2)}{J_2c^2};$$

$$k_3 = \frac{J_1J_2^2\omega_{0r}^3 - 3cJ_1J_2\omega_{0r} + bc(J_1 + J_2)}{J_2c}, \quad (2)$$

где  $J_1, J_2, c, b$  - соответственно моменты инерции первой эквивалентной (двигателя) и второй (РМ) масс, коэффициенты жесткости и вязкости.

Соотношения (2) позволяют автоматизировать процессы синтеза и настройки РС, разработать алгоритмы оптимизации или адаптации его параметров в условиях вариации параметров механики объекта.



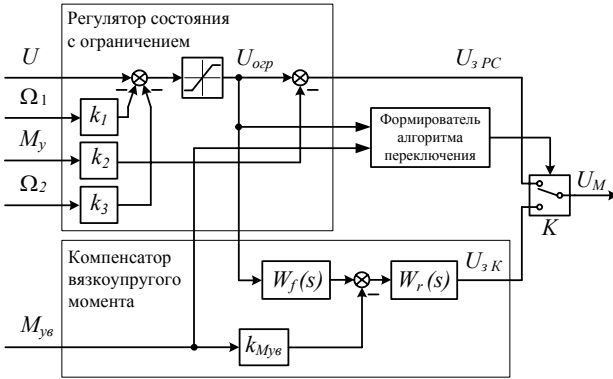


Рис. 2. Структурная схема нелинейного регулятора состояния переменной структуры

Для ограничения упругого и вязкоупругого моментов в РС выделен контур упругого момента с его ограничением на входе. Для оптимизации процессов в выделенном контуре синтезирован компенсатор вязкоупругого момента, представляющий собой пропорциональный регулятор момента и

апериодический фильтр на входе контура с передаточными функциями:

$$W_f(s) = \frac{c(J_1 + J_2 + J_2 k_{n\_MyB})}{J_2 k_{n\_MyB} (c + bs)} \cdot \frac{c^2}{J_1 \omega_{0r}^2 (3c - b\omega_{0r})}, \quad (3)$$

$$W_r(s) = k_{n\_MyB} = \frac{4cJ_1 J_2 - b^2 (J_1 + J_2)}{b^2 J_2}, \quad \text{при } k_{MyB} = 1, \quad \omega_{0r\_MyB} = \frac{2c}{b}.$$

Переключение структуры РС выполняется в соответствии со следующим алгоритмом:

$$U_M = \begin{cases} U_{3 PC}, & \text{при } |U_{опр}| < S_{опр}, \\ U_{3 K}, & \text{при } |U_{опр}| \geq S_{опр}. \end{cases} \quad (4)$$

где  $S_{опр} = \frac{M_{y\_опр} J_1 \omega_{0r}^2 (3c - b\omega_{0r})}{c^2}$  – уровень ограничения сигнала на входе контура упругого момента.

Как показали имитационные эксперименты, использование разработанного РС (рис. 2) в системе управления многосвязным асинхронным ЭП объекта с нежесткой механикой обеспечивает монотонное изменение как скорости РМ, так и моментов во всех режимах работы, а также ограничивает упругий момент на заданном уровне.

Обеспечение работоспособности и основных показателей качества разработанной системы управления в условиях вариации параметров объекта достигается настройкой РС. Одним из требований к настройке его параметров является обеспечение высоких демпфирующих свойств и сохранение монотонности переходных процессов в системе управления при заданном быстродействии в условиях вариации параметров механики.

Рассмотрено использование пакета прикладных программ *Simulink Response Optimization* для решения поставленной задачи. Выявлены достоинства и недостатки указанного инструмента, главным из которых является невозможность с его помощью обеспечить одновременно монотонность переходных процессов как скорости РМ, так и упругого момента в условиях вариации параметров объекта.

Предложена обобщенная методика настройки параметров РС, в основу которой положено определение параметров механики, обуславливающих наибольшую колебательность переходных процессов, и расчет по ним параметров регулятора (2)–(4). Методика состоит из этапов определения варьируемых параметров и требований к системе управления, её линеаризации, поиска наилучшего сочетания значений варьируемых параметров, расчете параметров регулятора при найденных значениях варьируемых параметров и проверки выполнения поставленных на первом этапе требований.

В результате анализа соотношений, полученных для резонансной частоты  $\omega_p$  и ЛАЧХ двухмассовой вязкоупругой ЭМС в виде:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{c(J_1 + J_2)}{J_1 J_2} - \left( \frac{b(J_1 + J_2)}{\sqrt{2} J_1 J_2} \right)^2}; \quad (5)$$

$$L_{10}(\omega) = 20 \lg \left[ \sqrt{\frac{c^2 + b^2 \omega^2}{\omega^2 ((c(J_1 + J_2) - J_1 J_2 \omega^2)^2 + b^2 \omega^2 (J_1 + J_2)^2)}} \right],$$

и исследования влияния на них вариации параметров механики установлено, что знаки изменения каждого параметра механики и частоты  $\omega_p$  совпадают.

С учетом того, что колебательность скорости РМ во временной области наиболее существенно проявляется на частоте задающего сигнала, равной  $\omega_p$ , показана возможность определения искомой настройки регулятора при известных предельных значениях параметров механики объекта:  $J_1 \cdot n_1$  и  $J_1/n_1$ ,  $J_2 \cdot n_2$  и  $J_2/n_2$ ,  $c \cdot n_3$  и  $c/n_3$ ,  $b \cdot n_4$  и  $b/n_4$ , где  $n_1, n_2, n_3, n_4$  – задаваемые, исходя из особенностей объекта или технологического процесса, кратности изменения параметров.

На основе декомпозиции системы управления к подсистеме с линейным РС и одноконтурной подсистеме регулирования вязкоупругого момента рассмотрено влияние каждого из параметров механики и их сочетаний, а также среднегеометрического корня на динамику системы. В результате установлено, что искомой является настройка РС (рис. 2) на следующее сочетание параметров:  $J_1 \cdot n_1$ ,  $J_2/n_2$ ,  $c/n_3$ ,  $b/n_4$ . Анализ временных характеристик системы до (рис. 3) и после (рис. 4) настройки параметров РС показывает, что в результате сохраняется быстродействие системы и монотонность переходных процессов как скорости РМ, так и упругого момента. На рис. 3 и 4

кривая 1 получена при параметрах механики объекта  $J_1 \cdot 1,5$ ,  $J_2/5$ ,  $c/2$ ,  $b/2$ , кривая 2 – при исходных параметрах  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $c$ ,  $b$ , кривая 3 – соответственно при  $J_1/1,5$ ,  $J_2/5$ ,  $c \cdot 2$ ,  $b/2$ .

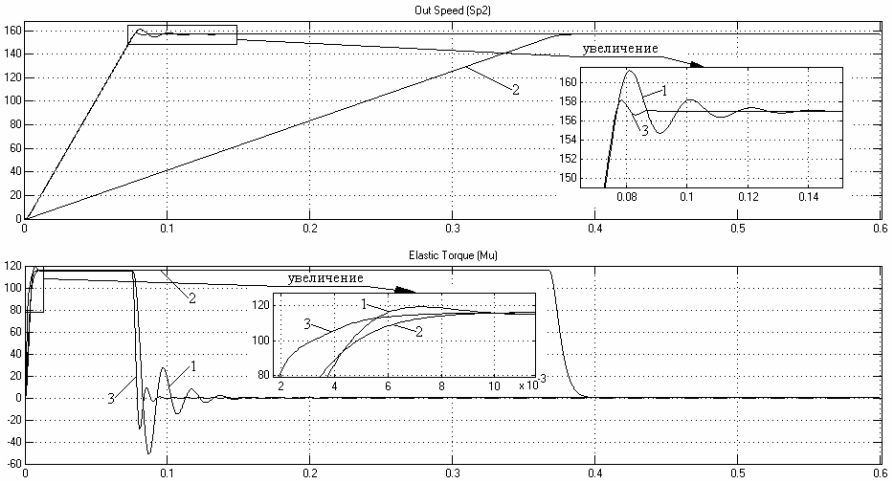


Рис. 3. Переходные процессы скорости рабочей машины и упругого момента при стандартной настройке регулятора

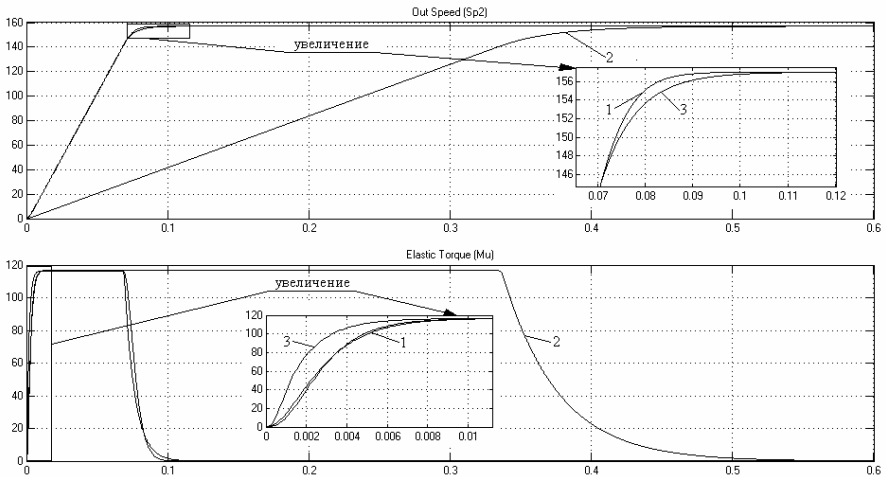


Рис. 4. Переходные процессы скорости рабочей машины и упругого момента с предложенной настройкой регулятора

**В четвертом разделе** рассмотрена задача информационного обеспечения РС, в том числе в условиях действия внешних возмущений. Наличие возмущения вносит вынужденную составляющую в переходный процесс восстановления переменной НС. При постоянном возмущении имеет место статическая ошибка восстановления переменной, которая увеличивается при линейно нарастающем возмущении. При оборотных пульсациях статического момента ошибка изменяется по гармоническому закону. Ошибки в канале обратной связи по состоянию объекта приводят к недопустимым погрешностям при управлении состоянием объектов с нежесткой механикой.

Предложена методика синтеза структуры и анализа динамики НС как без учета, так и с учетом возмущений, действующих на объект. В основе методики лежит представление информации о возмущении в виде математической модели и расширении, с её учетом, модели объекта управления. Представление возмущения с разной степенью детализации (квазистационарное, с квазистационарной скоростью изменения и т.д.) позволяет синтезировать НС с астатизмом 1-го, 2-го и т.д. порядка. Использование астатических НС в системах управления объектами с нежесткой механикой позволяет не только безошибочно восстанавливать переменные объекта, но и оценивать возмущение при разработке системы управления, инвариантной к действию внешних возмущений.

Для математической модели многосвязного асинхронного ЭП с нежесткой механикой разработаны структуры и получены аналитические соотношения для параметров НС полного и с астатизмом первого и второго (рис. 5) порядков. Исследованы их статические и динамические характеристики. Выполненные исследования подтвердили теоретические положения о том, что в оценках переменных отсутствуют ошибки, соответствующие порядку астатизма НС. Показано, что с ростом полосы

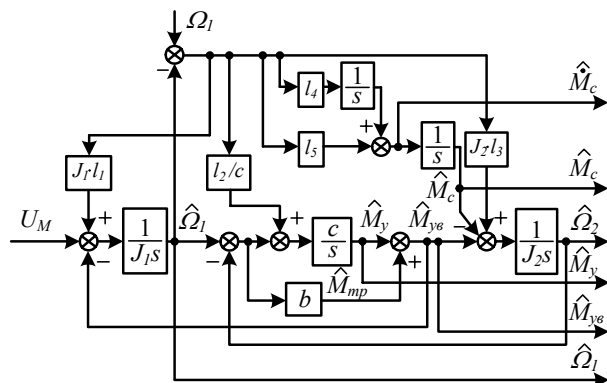


Рис. 5. Структурная схема наблюдателя состояния с астатизмом второго порядка

пропускания наблюдателя уменьшаются ошибки восстановления переменных.

Выполнен анализ реализуемости задаваемой полосы пропускания НС в цифровой системе управления. Разработан алгоритм и программа

вычисления наибольшего реализуемого значения полосы пропускания при заданных в процессе синтеза НС периоде расчета и размерности переменных.

Исследование чувствительности НС к вариации параметров механики объекта при изменении момента двигателя позволило установить отсутствие установившейся ошибки при восстановлении скоростей двигателя и РМ астатическими НС и её наличие при восстановлении упругого момента в случае отклонения  $J_1$ . Также установлено, что возникающие ошибки восстановления момента и динамическая восстановления скоростей имеют знак, зависящий от знака отклонения параметра механики, что может быть использовано для настройки НС и РС.

Выполнен анализ необходимых условий реализации и предложена структура динамического закрытия зазора механических передач, среди которых основным является наличие информации о моментах в кинематических связях, получаемой от НС. Предложен метод мягкого, безударного зацепления зубьев шестерен в системах ЭП.

**Пятый раздел** посвящен разработке и реализации средств коммуникации систем многосвязного ЭП. Предложена методика разработки средств коммуникации, включающая этапы определения требований, выбора аппаратных и программных средств коммуникации, их реализации, тестирования и корректировки, разработки технической документации и проведения испытаний.

Использование предложенной методики при разработке средств коммуникации многосвязного ЭП на базе комплектных ЭП серии ЭПВ позволило получить набор указанных средств с функциональными возможностями, не уступающими, а по ряду показателей превосходящими лучшие зарубежные аналоги. Так реализованный протокол *MODBUS* поддерживает режимы как *RTU*, так и *ASCII*, скорость передачи данных до 125 кбит/с и 11 стандартных функций *MODBUS*. Время реакции на кадры управления составляет менее 1 миллисекунды, что позволяет реализовать в одном из ПЧ программный модуль управления системой многосвязного ЭП в режиме реального времени вместо использования для этих целей промышленного контроллера.

Созданный программный комплекс для персонального компьютера *VCDrive* позволяет управлять и диагностировать, в том числе с помощью встроенного виртуального осциллографа, систему ЭП в режиме реального времени, настраивать её в автоматизированном режиме, а также обновлять программное обеспечение преобразователей частоты.

На испытательном стенде (рис. 6), включающем кинематически связанные асинхронный (АИР100Л4У3: 4 кВт, 1410 об/мин, 8,5 А) и синхронный (5ДВМ215 А25ЕТ2УХЛ4: 2000 об/мин, 15 А, 23 Нм) двигатели  $I$  с датчиками скорости ЛИР-ПП-158 (энкодер, 10000 меток/оборот) и ЛИР-ПР-158АТ (резольвер, 10000 периодов), а также индивидуальными преобразова-

телями частоты 2 (ЭПВ-ТТПТ-16- 380-2АП и ЭПВ-ТТПТ-25-380-3СР, управляющий контроллер ADMC 401, интерфейсный – FUJITSU MB90F598G), объединенными в сеть 3 *MODBUS* (RTU, 115200 бит/с) с управлением от персонального компьютера 4, проведены экспериментальные исследования разработанных средств коммуникации, подтвердившие их широкие функциональные возможности и соответствие поставленным при разработке требованиям.

В качестве иллюстрации, на рис. 7 приведена полученная с помощью программы *VCDrive* осциллограмма отработки асинхронным ЭП периодически изменяющегося задания, поступающего по коммуникационному каналу *MODBUS*.



Рис. 6. Общий вид экспериментального стенда

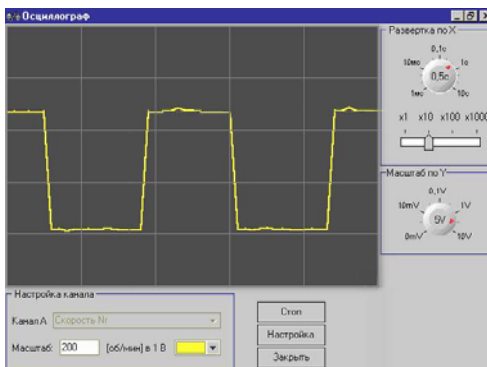


Рис. 7. Осциллограмма отработки задания, поступающего от ПК по каналу *MODBUS*

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы.

**В приложениях** приведены результаты исследований и программы, не вошедшие в основную часть работы, акты внедрения.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определены основные требования к системе многосвязного асинхронного ЭП, имеющей в своем составе два и более комплектных ЭП с векторной системой управления, связанных через нежесткие кинематические связи с одной рабочей машиной, включающие обеспечение монотонности переходных процессов с сохранением работоспособности и основных показателей качества в условиях изменения параметров механики и действующих

внешних возмущений, а также свободного информационного обмена между элементами системы ЭП.

2. Предложена классификация и выполнен анализ способов демпфирования механических колебаний, в результате которого установлено, что наиболее эффективным способом удовлетворения поставленных требований является использование методов теории пространства состояний.

3. Установлено, что использование системы векторного управления с ориентацией вектора тока статора по вектору потокосцепления ротора исключает демпфирование двигателем колебаний механической части ЭП и позволяет реализовать предельно допустимое быстродействие в контуре электромагнитного момента двигателя, который при синтезе регуляторов механических координат ЭП может быть представлен безынерционным динамическим звеном.

4. Для распределения корней характеристического уравнения по бинному Ньютона, обеспечивающего монотонный характер переходных процессов, получены аналитические зависимости и процедуры определения среднегеометрического корня как по заданному времени регулирования, так и по требуемой полосе пропускания, что также позволяет корректно соотносить требования к динамике регуляторов и наблюдателей состояния.

5. Предложена структура и методика расчета по заданным параметрам механики, уровню ограничения моментов и полосе пропускания системы параметров нелинейного регулятора состояния переменной структуры, обеспечивающего при заданном быстродействии монотонность переходных процессов скорости рабочей машины, а также моментов в передачах при их ограничении.

6. Предложена обобщенная методика настройки параметров разработанного регулятора состояния, обеспечивающая монотонность переходных процессов скорости рабочей машины и вязкоупругого момента при вариациях параметров механики и не снижающая быстродействие системы.

7. Разработана методика синтеза статических и астатических наблюдателей состояния, в основе которой лежит представление информации о внешних воздействиях в виде математической модели возмущения и расширении с её учетом модели объекта управления, что позволяет учитывать с разной степенью детализации любое количество возмущений, действующих на объект.

8. Для рассматриваемого в работе класса объектов разработаны математические модели наблюдателей состояния полного и с астатизмом первого и второго порядков, исследования которых подтвердили отсутствие в восстановленных значениях переменных объекта установившихся ошибок, соответствующих порядку астатизма наблюдателя, а также позволили выявить зависимость ошибок восстановления переменных от знака отклонения пара-

метров механики, что может быть использовано для настройки наблюдателей и регулятора состояния.

9. Предложена структура системы динамического закрытия зазора механических передач, позволяющая с минимальными затратами мощности закрывать зазор в любых режимах работы ЭП, а также метод мягкого, безударного зацепления зубьев шестерен с использованием элемента с  $S$ -образной характеристикой.

10. Предложена методика разработки средств коммуникации электропривода, включающая этапы определения требований, реализации и проведения испытаний аппаратных и программных средств коммуникации, использование которой при создании преобразователей частоты серии ЭПВ и учебно-исследовательских стендов на их базе позволило обеспечить свободный информационный обмен в режиме реального времени между элементами систем ЭП.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ**

### **в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Анализ вариантов построения регуляторов и наблюдателей САУ с упругими связями / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.– 2003.– № 5.– С. 87-93.

2. Многомассовые нежесткие электромеханические системы с модальными регуляторами переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Вестник ИГЭУ.– Иваново, 2003.– № 1.– С. 44-51.

3. Система управления асинхронным электроприводом с нелинейным модальным регулятором переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.– 2005.– № 2.– С. 87-90.

4. Глазунов, В.Ф. Разработка и исследование многодвигательных систем электроприводов переменного тока с нежесткой механикой / В.Ф. Глазунов, С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов // Вестник ИГЭУ.– Иваново, 2005.– № 3.– С. 6-11.

5. Гнездов, Н.Е. Оптимизация параметров нелинейного регулятора состояния переменной структуры в электроприводах с нежесткой механикой / Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Вестник ИГЭУ.– Иваново, 2007.– № 3.– С. 33-36.

6. Лебедев, С.К. Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов / С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков // Вестник ИГЭУ.– Иваново, 2008.– № 3.– С. 14-16.

### **в прочих изданиях:**



7. Глазунов, В.Ф. Цифровые алгоритмы модального управления электроприводом с нежесткой механикой / В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (ПОИСК – 2003): Сб. материалов межвузовской науч.-технич. конф. аспирантов и студентов.– Иваново: ИГТА, 2003.– С. 227-228.

8. Гнездов, Н.Е. Проектирование цифровых наблюдателей состояния многомассовых нежестких электромеханических систем / Н.Е. Гнездов, А.Е. Круглов, С.К. Лебедев // Перспективы использования компьютерных технологий в текстильной и легкой промышленности (ПИКТЕЛ – 2003): Сб. материалов I междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГТА, 2003.– С. 126-127.

9. Синтез цифровой системы управления многосвязным асинхронным электроприводом с нежесткой механикой / С.К. Лебедев, А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, И.В. Токарев, Д.Б. Николаев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XI Бенардосовские чтения): Тез. докл. междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГЭУ, 2003.– Т. 1.– С. 216.

10. Digital control system design for induction motor drive with unrigid mechanics / A.B. Vinogradov, V.F. Glazunov, N.E. Gnezdov, S.K. Lebedev // Proc. "Theory and Engineering of Metallurgical Processes. International Scientific and Technical Conference. Cracow, 10-12 June 2003."– Cracow: AGH, 2003.– P. 357-369.

11. Гнездов, Н.Е. Алгоритмы практической реализации цифровых наблюдателей состояния в МПЦ СУ ЭП / Н.Е. Гнездов, В.Ф. Глазунов, С.К. Лебедев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. десятой ежегодн. междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов.– Москва: МЭИ, 2004.– Т. 2.– С. 98-99.

12. Система динамического закрытия зазора в упруговязкой электромеханической системе / Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев, И.В. Токарев, В.Ф. Глазунов // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (ПОИСК – 2004): Сб. материалов межвузовской науч.-технич. конф. аспирантов и студентов.– Иваново: ИГТА, 2004.– С. 88-89.

13. Наблюдатели состояния многомассовых нежестких электромеханических систем / С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов, А.Е. Круглов, Д.Б. Николаев // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (ПОИСК – 2004): Сб. материалов межвузовской науч.-технич. конф. аспирантов и студентов.– Иваново: ИГТА, 2004.– С. 93-94.

14. Журавлев, С.В. Многофункциональный программно-аппаратный комплекс управления преобразователями частоты серии ЭПВ // С.В. Журавлев, Н.Е. Гнездов, В.Л. Чистосердов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): Тез. докл. междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГЭУ, 2005.– Т. 1.– С. 183.

15. Лебедев, С.К. Исследование наблюдателей состояния механических переменных электроприводов / С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов, К.С. Лебедев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): Тез. докл. междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГЭУ, 2005.– Т. 1.– С. 186.

16. Разработка многодвигательных систем с нежесткой механикой на базе электроприводов серии ЭПВ / В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев, И.В. Орлов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): Тез. докл. междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГЭУ, 2005.– Т. 1.– С. 187.

17. Гнездов, Н.Е. Обеспечение ограничения переменных и робастности в электроприводах с нежесткой механикой / Н.Е. Гнездов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XIV Бенардосовские чтения): Тез. докл. междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГЭУ, 2007.– Т. 1.– С. 234.

18. Чистосердов, В.Л. Средства коммуникации современных электроприводов переменного тока / В.Л. Чистосердов, Н.Е. Гнездов, С.В. Журавлев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XIV Бенардосовские чтения): Тез. докл. междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново: ИГЭУ, 2007.– Т. 1.– С. 251.

**ГНЕЗДОВ Николай Евгеньевич**

**МНОГОСВЯЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И НЕЖЕСТКОЙ МЕХАНИКОЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.

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

Печать плоская. Усл. Печ. Л. 1, . . .

Тираж 100 экз. Заказ № . . .

ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в РИО ИГЭУ