

*На правах рукописи*



**ВДОВИН ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ  
БЕЗДАТЧИКОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
**Панкратов Владимир Вячеславович**

**Официальные оппоненты:** **Поляков Владимир Николаевич,**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок

**Ланграф Сергей Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры электропривода и электрооборудования

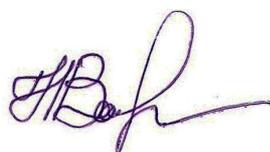
**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита состоится «15» мая 2014 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



Нейман Владимир Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Основными видами электрических машин переменного тока малой и средней мощности, применяемыми в системах регулируемого электропривода (ЭП), являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР) и синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). Векторное управление ими позволяет достигать высоких динамических и статических показателей ЭП, удовлетворяющих требованиям большинства промышленных механизмов. Для построения замкнутых систем регулируемого ЭП с векторным управлением необходима информация о токах двигателя, опорном векторе потокосцеплений и частоте вращения. Прямое измерение потокосцеплений и скорости в общепромышленных ЭП затруднительно, поэтому широкое практическое применение находят алгоритмы так называемого бездатчикового (sensorless) векторного управления. Разработка методов построения систем управления ЭП переменного тока с различными наблюдателями и алгебраическими вычислителями явилась предпосылкой для появления к середине 80-х годов 20-го века первых серийных ЭП, не оснащенных датчиками магнитного состояния и координат механического движения (скорости, положения ротора), однако до сих пор они имеют существенные ограничения по диапазону и режимам регулирования.

Значительный вклад в исследование структур и разработку алгоритмов бездатчикового векторного управления внесли зарубежные и отечественные ученые F. Blaabjerg, A. Consoli, M. Iwata, G. Griva, G. Hennenberger, J. Holtz, R. Jötten, H. Kubota, T.A. Lipo, R.D. Lorenz, T. Ohtani, C. Schauder, И.Я. Браславский, А.Б. Виноградов, В.М. Завьялов, А.М. Зюзев, Д.Б. Изосимов, В.Г. Каширских, С.В. Ланграф, В.В. Панкратов, С.М. Пересада, В.В. Рудаков, Ю.С. Усынин, Р.Т. Шрейнер и многие другие.

Современный бездатчиковый электропривод на базе АДКЗР или СДПМ содержит преобразователь частоты (ПЧ), оснащенный датчиками только электрических величин – токов и напряжений двигателя. Большинство мощных АДФР имеет питание от промышленной сети 6 – 10 кВ, что при управлении со стороны статора требует применения ПЧ с соответствующим выходным напряжением. Текущий уровень развития силовой полупроводниковой техники предполагает построение такого преобразователя в виде многоуровневого ПЧ, обладающего высокой стоимостью. Более дешевым вариантом является установка ПЧ в роторную цепь, линейное напряжение которой, как правило, составляет 500 – 1000 В. Статорная обмотка при этом питается от промышленной сети 6 – 10 кВ. Такое включение АДФР носит название «асинхронизированная синхронная машина» (АСМ).

Большинство методов бездатчикового управления, описанных как в зарубежной, так и в отечественной литературе, основаны на математических моделях электромагнитных процессов, протекающих в машине переменного тока. Все они совмещают вычисление оценки частоты вращения с вычислением мо-

дуля и углового положения опорного вектора потокосцеплений и отличаются друг от друга точностью оценивания скорости, чувствительностью к дрейфу параметров, входящих в математическую модель наблюдателя, способностью функционировать в характерных областях на плоскости механических характеристик ЭП. Диапазон регулирования скорости в двигательном режиме в практических разработках бездатчиковых электроприводов не превышает 50...100:1, а в режимах генераторного торможения значительно уже.

Алгоритмы оценивания неизмеряемых координат систем бездатчикового векторного управления можно разделить на пассивные и активные. Активные алгоритмы предполагают введение в основной спектр напряжения или тока специальных тестовых воздействий для дальнейшего анализа реакции на них электрической машины. Однако, инжектируя тестовые сигналы даже с довольно малой амплитудой, приходится мириться с дополнительными потерями в двигателе и ПЧ, что ухудшает энергоэффективность электромеханической системы в целом и увеличивает установленную мощность силовых элементов.

Системы пассивного оценивания делятся на неадаптивные и адаптивные. Неадаптивные системы используют либо статорную модель электромагнитных процессов либо роторную. Адаптивные же системы используют две модели – эталонную и настраиваемую, что расширяет их функциональные возможности. Для построения таких алгоритмов используется метод функций Ляпунова.

Диапазон регулирования известных бездатчиковых электроприводов ограничен как точностью применяемых датчиков и неидеальностями ПЧ, так и принятыми при разработке алгоритмов оценивания координат и параметров допущениями, а также практической реализацией присутствующих в них идеальных звеньев интегрирования и дифференцирования. Существенное ограничение диапазона регулирования вызвано также чувствительностью этих алгоритмов к изменениям параметров электрической машины, которыми оперирует вычислитель, от их реальных величин. Наиболее критичными являются отклонения активных сопротивлений статорной и роторной цепей, которые обусловлены нагревом машины и питающего кабеля.

Проблема синтеза и реализации алгоритмов оценивания координат и параметров машин переменного тока, не имеющих теоретических ограничений и формально работоспособных во всех точках плоскости механических характеристик ЭП, представляет значительный научно-практический интерес и в литературных источниках рассмотрена в недостаточной степени.

**Целью работы** является построение на единой методической основе и исследование адаптивных алгоритмов вычисления неизмеряемых координат систем векторного управления электроприводами на базе АДКЗР, СДПМ и АДФР, пригодных для их применения в четырехквadrантном общепромышленном ЭП переменного тока с расширенным диапазоном регулирования.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы следующие **задачи**.

1. Проанализировать известные математические модели управляемых АДКЗР, СДПМ и АСМ, используемые при построении систем регулируемого ЭП, опре-

делить рациональные формы их представления при оценивании неизмеряемых координат электропривода.

2. Разработать и исследовать адаптивные алгоритмы вычисления опорного вектора потокосцеплений и частоты вращения ротора АДКЗР, СДПМ и АСМ по основным (рабочим) составляющим электрических величин, не требующие инъекции в двигатель специальных тестовых воздействий и формально работоспособные на всей плоскости механических характеристик электропривода.

3. На основе полученных результатов сформулировать обобщенную методику синтеза алгоритмов оценивания координат регулируемых электроприводов переменного тока при измерениях электрических переменных на выходе преобразователя частоты.

#### **Научная новизна работы.**

1. Сформулирована новая обобщенная методика структурно-параметрического синтеза адаптивных алгоритмов текущего оценивания координат и параметров электрических машин переменного тока в условиях неполных измерений, использующая в структуре вычислителя наблюдатель электромагнитных процессов полного порядка и, в отличие от известных, обеспечивающая устойчивость процессов оценивания во всех режимах работы электропривода благодаря целенаправленному заданию соотношений между элементами матрицы «стабилизирующей добавки» и матрицы весовых коэффициентов функции Ляпунова.

2. Разработаны алгоритмы оценивания опорного вектора потокосцеплений и частоты вращения ротора АДКЗР и неявнополюсного СДПМ по основным рабочим гармоникам электрических величин с возможностью адаптации к изменениям активного сопротивления статора и вычисления его текущего значения. Алгоритмы отличаются от известных работоспособностью во всех четырех квадрантах плоскости механических характеристик ЭП без инъекции в двигатель дополнительных тестовых воздействий. Сформулирована методика расчета параметров предложенных законов адаптации наблюдателей по частоте вращения и активному сопротивлению статора, учитывающая положение рабочей точки ЭП и обеспечивающая желаемое качество процессов оценивания. Предложен новый высокоэффективный алгоритм активной предварительной идентификации параметров схемы замещения АДКЗР, совмещенный с процессом намагничивания двигателя.

3. На основе структуры наблюдателя электромагнитных процессов полного порядка разработан новый пассивный алгоритм оценивания опорного вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АСМ, работоспособный во всех четырех квадрантах плоскости механических характеристик ЭП без формальных ограничений по частоте скольжения.

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

Разработанные алгоритмы оценивания позволяют существенно расширить диапазоны регулирования скорости бездатчиковых электроприводов, относятся к классу пассивных, поскольку не вносят искажений в спектр напряжения, формируемого на выходе ПЧ, и не требуют дополнительных энергетических и капитальных затрат. Оценивание вектора потокосцеплений, частоты вращения ро-

тора, активного сопротивления статора, являющееся результатом работы предложенных алгоритмов, предполагает прямое измерение только электрических величин, фигурирующих в структуре полупроводникового преобразователя частоты, и может быть реализовано на базе типовых измерительно-информационных средств промышленных ПЧ. Предложенная методика синтеза алгоритмов вычисления координат состояния и параметров двигателей переменного тока может быть использована для построения систем управления другими, схожими по структуре динамическими объектами.

#### **Методология и методы исследования.**

Для решения поставленных задач используются методы современной теории автоматического управления, положения теории электропривода, аналитические методы расчета, основанные на применении аппарата дифференциальных уравнений и передаточных функций. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов осуществляется методами цифрового моделирования в пакете программ Matlab 6.5 – Simulink 5.0 и натурного эксперимента.

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

1. Алгоритм вычисления вектора потокосцеплений ротора, частоты вращения ротора и активного сопротивления статора АДКЗР. Методика расчета коэффициентов законов адаптации. Алгоритм предварительной идентификации параметров двигателя.
2. Алгоритм вычисления направления вектора потокосцеплений от постоянных магнитов, частоты вращения ротора и активного сопротивления статора неявнополюсного СДПМ. Методика расчета коэффициентов законов адаптации.
3. Алгоритм вычисления вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АСМ.
4. Обобщенная методика синтеза алгоритмов текущего оценивания координат и параметров электроприводов переменного тока на основе адаптивной системы с наблюдателем полного порядка.

**Личный вклад автора** в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в постановке частных задач исследования, выполнении расчетов, разработке методик структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления и оценивания, исследовании синтезированных алгоритмов методом численного моделирования, анализе полученных результатов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автором осуществлены постановка задач исследования, выбор методов их решения и анализ результатов.

**Реализация результатов работы.** Результаты, полученные в диссертационной работе, приняты к внедрению в системах управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов и синхронных электроприводов специального назначения производства ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск), а также используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 7.559.2011, гос. рег. номер НИР 01201255056.

### **Степень достоверности и апробация работы.**

Достоверность изложенных в диссертации результатов и выводов подтверждается цифровым моделированием в пакете программ Matlab – Simulink и результатами натурного эксперимента.

Результаты работы были представлены на конференциях по итогам научной работы за 2009-2010 гг. и 2010-2011 гг. «Дни науки НГТУ – 2010» и «Дни науки НГТУ – 2011», Новосибирск; на Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 2009, 2010 гг.; XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2011 г.; V Юбилейной международной научно-технической конференции «Электромеханическое преобразование энергии», Томск, 2011 г.; XV научно-технической Международной конференции «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург, 2012 г.; VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2012 г.; V Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника», Новокузнецк, 2012 г.; на конкурсе молодежных научно-исследовательских работ, проводимом Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, 2013 г.; XIV Международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам EDM-2013, Алтай, 2013 г.

### **Публикации.**

Материалы диссертации нашли отражение в 18 опубликованных работах, в том числе в 4 статьях в ведущих рецензируемых журналах.

### **Объем и структура работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, списка используемой литературы из 64 наименований и 5 приложений. Количество страниц основного текста 211, в том числе рисунков 101, таблиц 12.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена математическому описанию электромагнитных процессов в машинах переменного тока. Математическая модель АДКЗР построена в координатах ток статора – потокосцепление ротора, модель СДПМ – в координатах ток статора – потокосцепление от постоянных магнитов. Обе модели представлены в декартовой системе координат, неподвижной относительно статора. Управляющим воздействием является напряжение, подаваемое на статор. Метаматематическая модель АСМ построена в координатах ток ротора – потокосцепление статора. Модель представлена в системе координат, неподвижной относительно ротора. Все модели приведены

к виду, соответствующему первой задаче диссертации, выявлены их общие особенности, позволяющие решать остальные задачи работы. С учетом значительной степени разделения темпов электромеханических переходных процессов в бездатчиковых ЭП и желаемых алгоритмов оценивания неизмеряемых координат для их построения предложено использовать адаптивные модели динамики электромагнитных переменных двигателя.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена методике структурного синтеза алгоритма оценивания опорного вектора потокосцеплений, частоты вращения ротора и активного сопротивления АДКЗР и анализу известных решений. Рассмотрены наиболее распространенные алгоритмы бездатчикового векторного управления АДКЗР, содержащие адаптивную систему с задающей (эталонной) моделью (АСЗМ) немецкого исследователя С. Schauder и алгоритмы на основе наблюдателей полного порядка (НПП) финского исследователя М. Hinkkanen и японского Н. Kubota. Показано, что область неработоспособности алгоритма АСЗМ лежит в области малых частот питания и обусловлена наличием «открытых» интеграторов в его структуре. Область неустойчивости наблюдателя НПП Н. Kubota расположена в генераторных режимах на малых частотах питания и граничит с характеристикой динамического торможения.

Для синтеза алгоритма оценивания координат и параметров математическая модель электромагнитных процессов АДКЗР представлена в виде

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}]^T$  – вектор координат состояния объекта;  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_s = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T$  – вектор управляющих воздействий;  $\mathbf{C} = [\mathbf{E} \quad \mathbf{0}]$  – матрица выхода;  $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{I}_s = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T$  – вектор-столбец доступных для прямого измерения переменных;  $\mathbf{A}$  – собственная матрица объекта,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r k_r^2}{L_{\sigma e}^s} \mathbf{E} - \frac{R_s}{L_{\sigma e}^s} \mathbf{E} & \frac{R_r k_r}{L_{\sigma e}^s L_r} \mathbf{E} - \frac{k_r}{L_{\sigma e}^s} \omega_e \mathbf{D} \\ k_r R_r \mathbf{E} & -\frac{R_r}{L_r} \mathbf{E} + \omega_e \mathbf{D} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\sigma e}^s} \mathbf{E} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$  – матрица управления;  $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  – единичная матрица;

$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $R_r, R_s, k_r, L_{\sigma e}^s, T_r, L_m$  – параметры двигателя;  $\omega_e$  – электрическая частота вращения ротора двигателя.

Математическая модель НПП в неподвижной системе координат:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}), \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\hat{\cdot}$  – знак оценки соответствующих величин;  $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_i \quad \mathbf{L}_\psi]^T$  – матрица «стабилизирующей добавки»;  $\hat{\mathbf{A}}$  – собственная матрица наблюдателя,

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}_r k_r^2}{L_{\sigma e}^s} \mathbf{E} - \frac{\hat{R}_s}{L_{\sigma e}^s} \mathbf{E} & \frac{\hat{R}_r k_r}{L_{\sigma e}^s L_r} \mathbf{E} - \frac{k_r}{L_{\sigma e}^s} \hat{\omega}_e \mathbf{D} \\ k_r \hat{R}_r \mathbf{E} & -\frac{\hat{R}_r}{L_r} \mathbf{E} + \hat{\omega}_e \mathbf{D} \end{bmatrix}.$$

Данная модель принята в качестве настраиваемой, в качестве эталонной модели используется непосредственно двигатель.

С помощью метода функций Ляпунова синтезированы предлагаемые законы адаптации НПП и матрица стабилизирующей добавки

$$\hat{\omega}_e = k_{\text{И}} \int \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \mathbf{D} \hat{\Psi}_r dt + k_{\text{П}} \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \mathbf{D} \hat{\Psi}_r; \quad \hat{R}_s = k_{\rho} \int \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \hat{\mathbf{I}}_s dt + R_{s0}; \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} -\hat{\omega}_e \mathbf{D} \frac{\hat{R}_s}{R_r} \frac{L_r}{L_{\sigma e}^s} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

где  $k_{\text{И}}$ ,  $k_{\text{П}}$  – коэффициенты пропорционально-интегрального закона адаптации по частоте вращения;  $\boldsymbol{\varepsilon}_i = \hat{i}_s - i_s$  – ошибка оценивания вектора токов;  $k_{\rho}$  – коэффициент интегрального закона адаптации по сопротивлению статора;  $R_{s0}$  – начальная (априорная) величина активного сопротивления статора.

Для расчета коэффициентов законов адаптации наблюдателя разработаны инженерные методики, основанные на линеаризации моделей квазиустановившихся режимов. Показано, что коэффициент адаптора по активному сопротивлению статора должен изменяться согласно положению рабочей точки в плоскости механических характеристик. Структурная схема предлагаемого алгоритма оценивания неизмеряемых координат и активного сопротивления статора АДКЗР представлена на рисунке 1.

Результаты цифрового моделирования работы разработанного алгоритма в составе бездатчикового ЭП на базе двигателя 4А225М4У3 мощностью 55 кВт представлены на рисунке 2. Здесь изображены процессы по механической частоте вращения, ошибке вычисления скорости и фазным токам статора при работе электропривода на частоте вращения  $\omega_{\text{НОМ}}/25$  при набросе номинальной генераторной нагрузки. Именно в этом режиме известный алгоритм оценивания (прототип) становится неустойчивым. Переходные процессы при работе ЭП на частоте вращения  $\omega_{\text{НОМ}}/25$  в генераторном режиме и отклонении активного сопротивления статора на 10% в большую и меньшую сторону приведены на рисунке 3.

Для определения параметров схемы замещения АДКЗР, необходимых для работы предлагаемого алгоритма оперативного оценивания, предложен алгоритм их предварительной идентификации, который может быть совмещен с этапом предварительного намагничивания двигателя.

**Третья глава** посвящена синтезу алгоритма вычисления положения, частоты вращения ротора неявнополюсного СДПМ и активного сопротивления

статора. Рассмотрен известный алгоритм вычисления координат СДПМ, использующий понятие расширенной ЭДС. Показано, что область неработоспособности данного алгоритма лежит в области малых частот вращения.

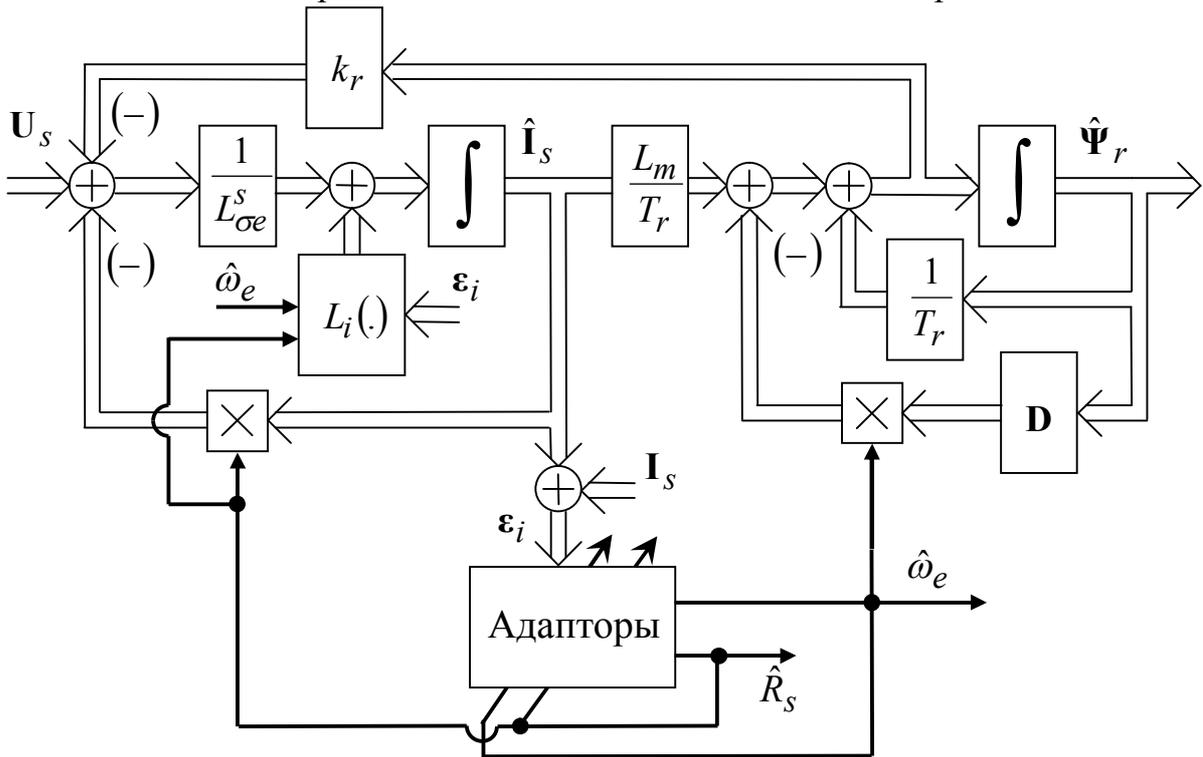


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма оценивания для АДКЗР

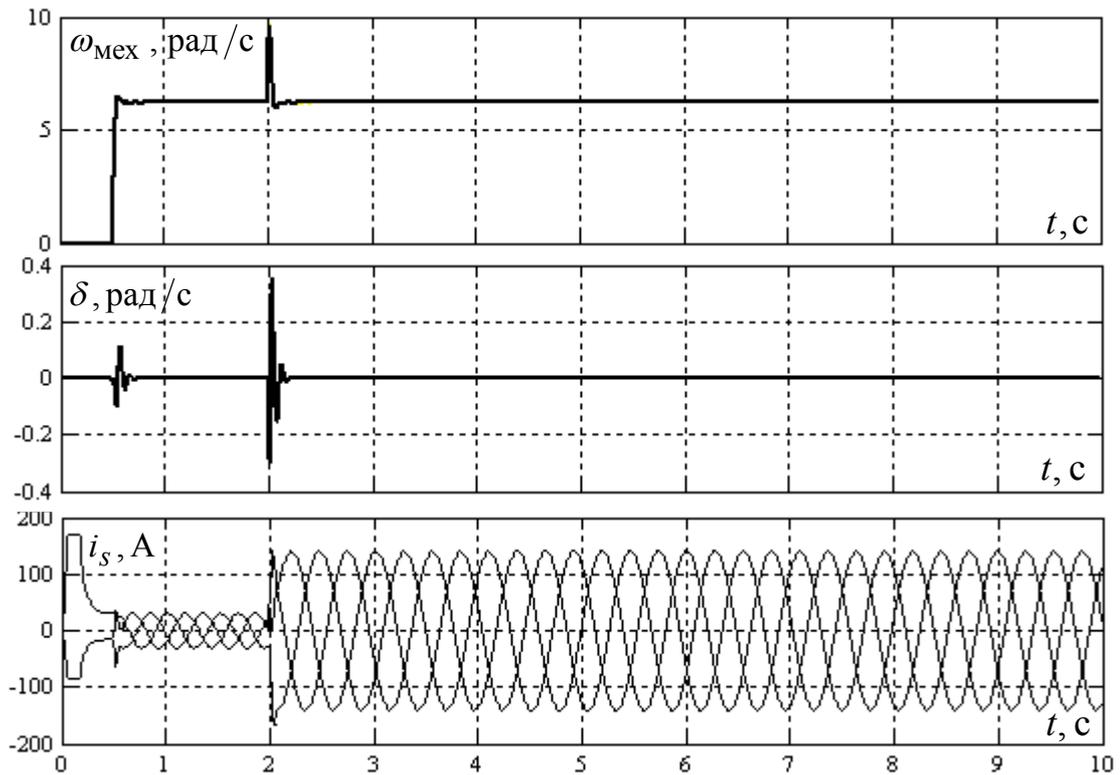


Рисунок 2 – Переходные процессы в ЭП с предлагаемым алгоритмом

Для синтеза алгоритма оценивания неизмеряемых координат математическая модель неявнополюсной СДПМ представлена в виде (1), где в данном случае  $\mathbf{x} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ z_\alpha \ z_\beta]^T = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \cos \gamma_e \ \sin \gamma_e]^T$  – вектор координат

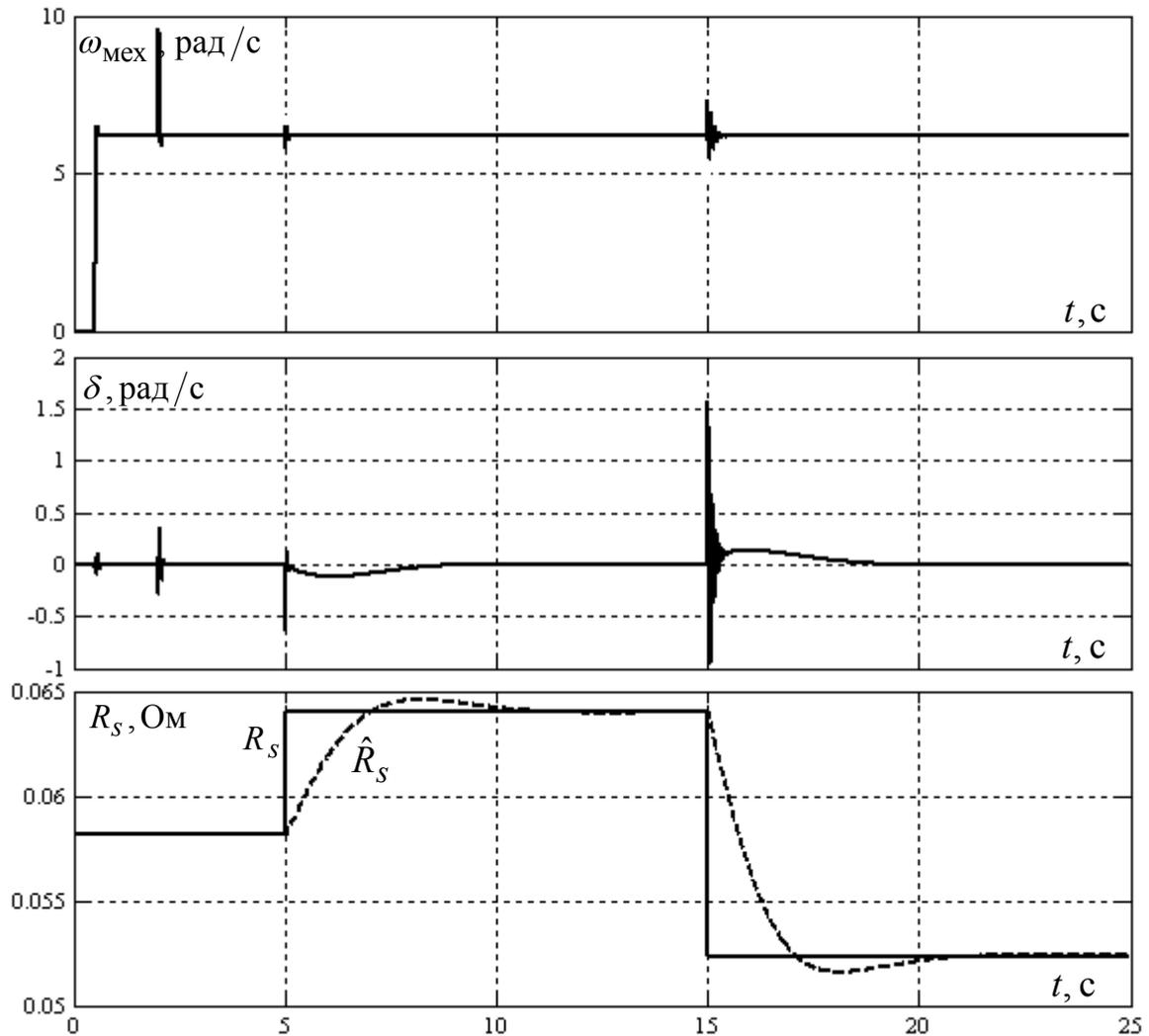


Рисунок 3 – Переходные процессы в ЭП с предлагаемым алгоритмом оценивания АДКЗР при отклонении активного сопротивления статора

состояния объекта;  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_s = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta}]^T$  – вектор управляющих воздействий;  $\mathbf{C} = [\mathbf{E} \ \mathbf{0}]$  – матрица выхода СДПМ;  $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{I}_s = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]^T$  – вектор-столбец доступных для прямого измерения переменных;  $\mathbf{A}$  – собственная матрица СДПМ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} \mathbf{E} & -\omega_e \frac{\Psi_\mu}{L_s} \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \mathbf{E} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$  – матрица управления;  $L_s = L_d = L_q$  – индуктивность СДПМ;  $\Psi_\mu$  –

потокосцепление статора от постоянных магнитов.

Математическая модель НПП также имеет вид (2), где  $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_i \quad \mathbf{L}_z]^\Gamma$  – матрица «стабилизирующей добавки»;  $\hat{\mathbf{A}}$  – собственная матрица наблюдателя,

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \mathbf{E} & -\hat{\omega}_e \frac{\Psi_\mu}{L_s} \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

С помощью метода функций Ляпунова получены законы адаптации данного НПП и матрица стабилизирующей добавки

$$\hat{\omega}_e = k_{\Pi} \int \boldsymbol{\varepsilon}_i^\Gamma \mathbf{D} \hat{\mathbf{z}} dt + k_{\Pi} \boldsymbol{\varepsilon}_i^\Gamma \mathbf{D} \hat{\mathbf{z}}; \quad \hat{R}_s = k_{\rho} \int \boldsymbol{\varepsilon}_i^\Gamma \hat{\mathbf{I}}_s dt + R_{s0}; \quad \mathbf{L} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{0}]^\Gamma.$$

Предложены методики расчета коэффициентов законов адаптации  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\Pi}$ ,  $k_{\rho}$ . Проведенное исследование показывает, что коэффициент передачи адаптора по сопротивлению статора  $k_{\rho}$  должен изменяться согласно положению рабочей точки в плоскости механических характеристик.

Структурная схема разработанного адаптивного алгоритма оценивания направления опорного вектора потокосцепления от постоянных магнитов, частоты вращения ротора и величины активного сопротивления статорной обмотки СДПМ представлена на рисунке 4.

На рисунке 5 приведены результаты цифрового моделирования работы предлагаемого алгоритма в бездатчиковом ЭП мощностью 160 кВт. Здесь изображены процессы по механической частоте вращения, ошибке вычисления скорости и фазным токам статора при работе электропривода на нулевой частоте вращения, набросе и сбросе номинальной нагрузки. Переходные процессы при работе ЭП на частоте вращения  $\omega_{\text{НОМ}}/10$  в генераторном режиме и отклонении активного сопротивления статора на 10% в большую и меньшую сторону представлены на рисунке 6.

Для ЭП турбомеханизмов предложено отказаться от сложных алгоритмов вычисления начального угла поворота ротора, а для фиксации положения ротора перед запуском формировать постоянный вектор токов, направленный по оси фазы А двигателя.

**Четвертая глава** посвящена методике структурного синтеза алгоритма оценивания опорного вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АСМ. Рассмотрены известные варианты построения алгоритмов наблюдения для АСМ. Показано, что области неработоспособности данных алгоритмов, в зависимости от используемой модели, находятся в области малых частот вращения или на синхронной и подсинхронных частотах вращения.

Для синтеза алгоритма оценивания неизмеряемых координат математическая модель АСМ представлена в виде (1), где  $\mathbf{x} = [i_{r\alpha} \quad i_{r\beta} \quad \psi_{s\alpha} \quad \psi_{s\beta}]^\Gamma$  – вектор координат состояния;  $\mathbf{U} = [U_{r\alpha} \quad U_{r\beta} \quad U_{s\alpha} \quad U_{s\beta}]^\Gamma$  – вектор управляющих воздействий;  $\mathbf{C} = [\mathbf{E} \quad \mathbf{0}]$  – матрица выхода;  $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{I}_r = [i_{r\alpha} \quad i_{r\beta}]^\Gamma$  – вектор-столбец измеряемых переменных;  $\mathbf{A}$  – собственная матрица,

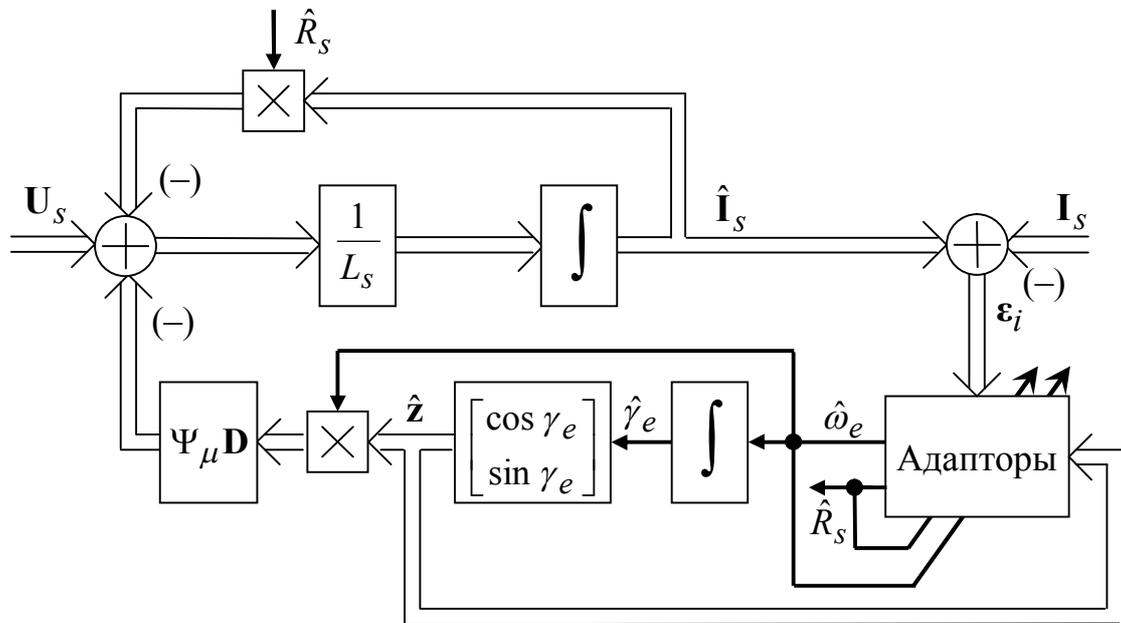


Рисунок 4 – Структурная схема алгоритма оценивания неизмеряемых координат и активного сопротивления статора СДПМ

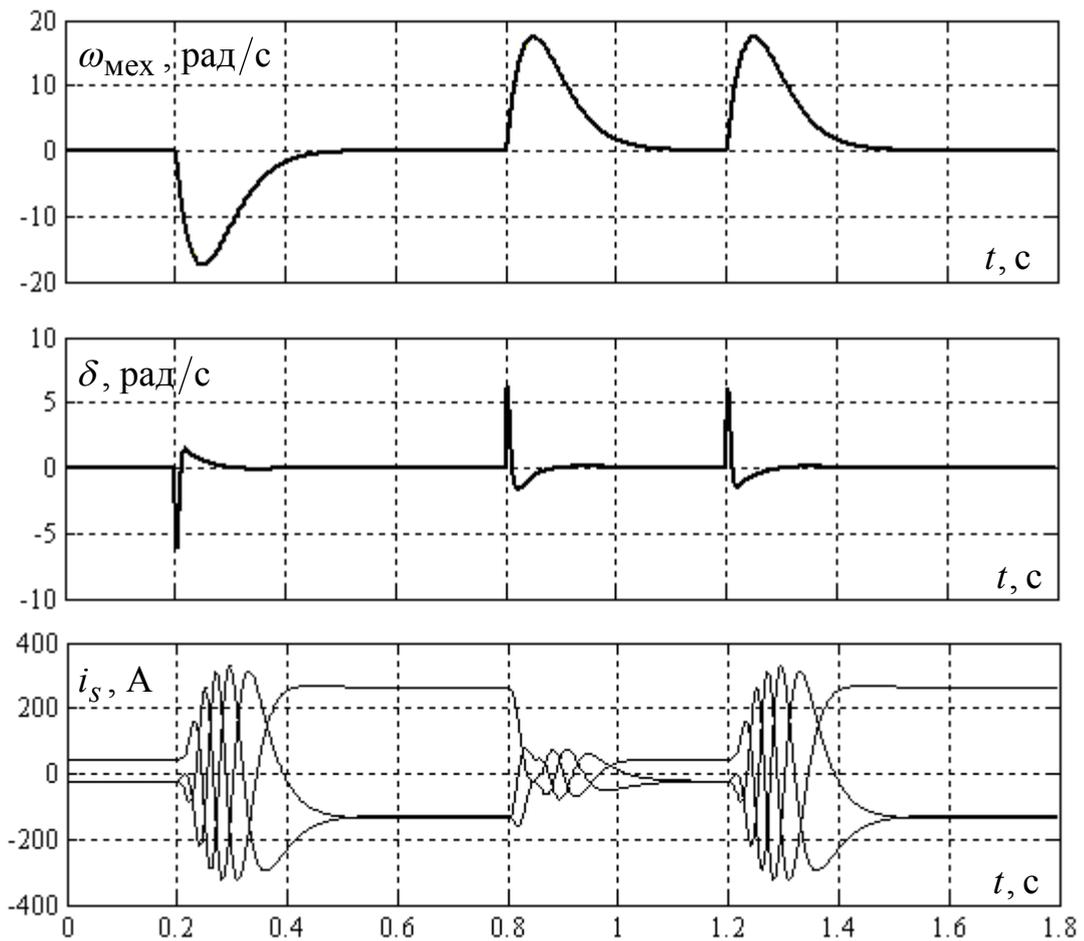


Рисунок 5 – Переходные процессы в ЭП с предлагаемым алгоритмом оценивания СДПМ

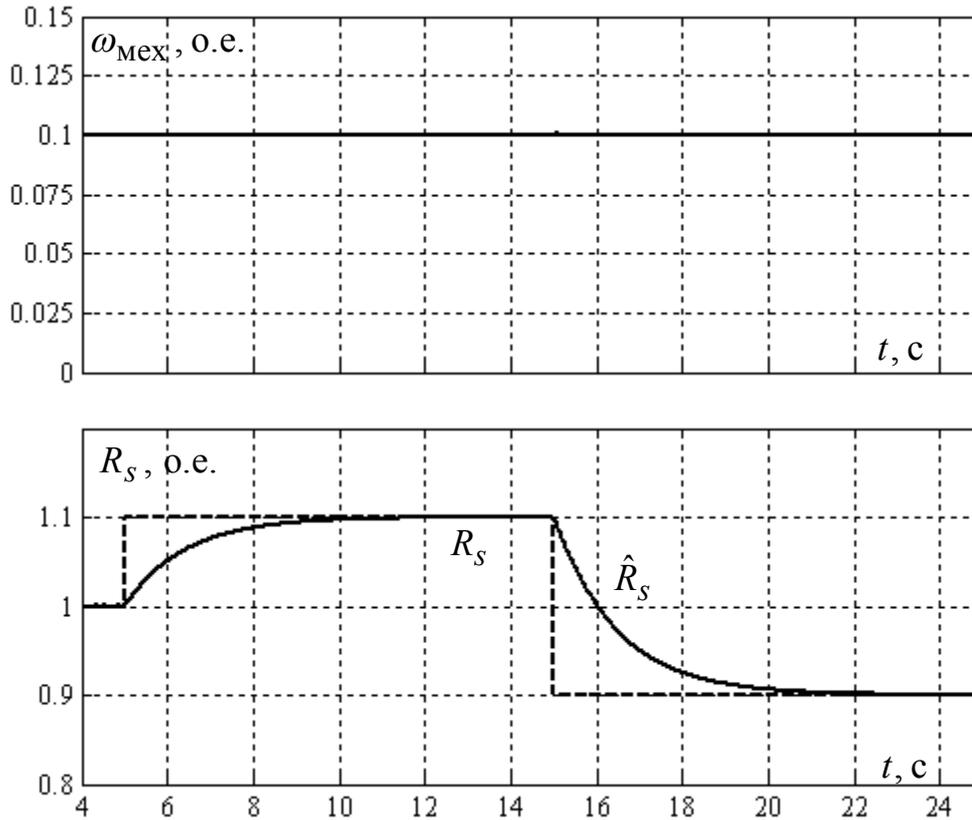


Рисунок 6 – Переходные процессы предлагаемого алгоритма оценивания СДПМ при отклонении активного сопротивления статора

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\sigma e}} \mathbf{E} + \omega_e \mathbf{D} & \frac{R_s k_s}{L'_{\sigma e} L_s} \mathbf{E} + \frac{k_s}{L'_{\sigma e}} \omega_e \mathbf{D} \\ k_s R_s \mathbf{E} & -\frac{R_s}{L_s} \mathbf{E} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L'_{\sigma e}} \mathbf{E} & -\frac{k_s}{L'_{\sigma e}} \mathbf{E} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix}$  – матрица управления;  $R_r, R_s, k_s, L'_{\sigma e}, T_r, L_m$  – параметры АСМ.

Математическая модель НПП также имеет вид (2), где  $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_i \quad \mathbf{L}_\psi]^\Gamma$  – матрица «стабилизирующей добавки»;  $\hat{\mathbf{A}}$  – собственная матрица наблюдателя

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\sigma e}} \mathbf{E} + \hat{\omega}_e \mathbf{D} & \frac{R_s k_s}{L'_{\sigma e} L_s} \mathbf{E} + \frac{k_s}{L'_{\sigma e}} \hat{\omega}_e \mathbf{D} \\ k_s R_s \mathbf{E} & -\frac{R_s}{L_s} \mathbf{E} \end{bmatrix}.$$

С помощью метода функций Ляпунова синтезированы закон адаптации наблюдателя по скорости и матрица стабилизирующей добавки

$$\hat{\omega}_e = -k_{\text{И}} \int \boldsymbol{\varepsilon}_i^\top \mathbf{D} \hat{\boldsymbol{\Psi}}_r dt - k_{\text{П}} \boldsymbol{\varepsilon}_i^\top \mathbf{D} \hat{\boldsymbol{\Psi}}_r; \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \hat{\omega}_e \mathbf{D} \frac{k_s^3 L_s R_s}{2R_r + R_s k_s^2} \end{bmatrix}.$$

Структурная схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 7.

Результаты цифрового моделирования предлагаемого алгоритма в бездатчиковом ЭП на базе двигателя 4АНК355М4У3 мощностью 400 кВт приведены на рисунке 8. Здесь изображены процессы по механической частоте вращения, фазным токам ротора и ошибке вычисления скорости при работе электропривода на синхронной частоте вращения, набросе и сбросе номинальной нагрузки.

В этой же, четвертой главе сформулирована обобщенная методика структурно-параметрического синтеза глобально устойчивых адаптивных алгоритмов текущего оценивания координат состояния и параметров электрических машин переменного тока в условиях неполных измерений, использующая в структуре вычислителя наблюдатель электромагнитных процессов полного порядка, которая также может быть использована для схожих объектов.

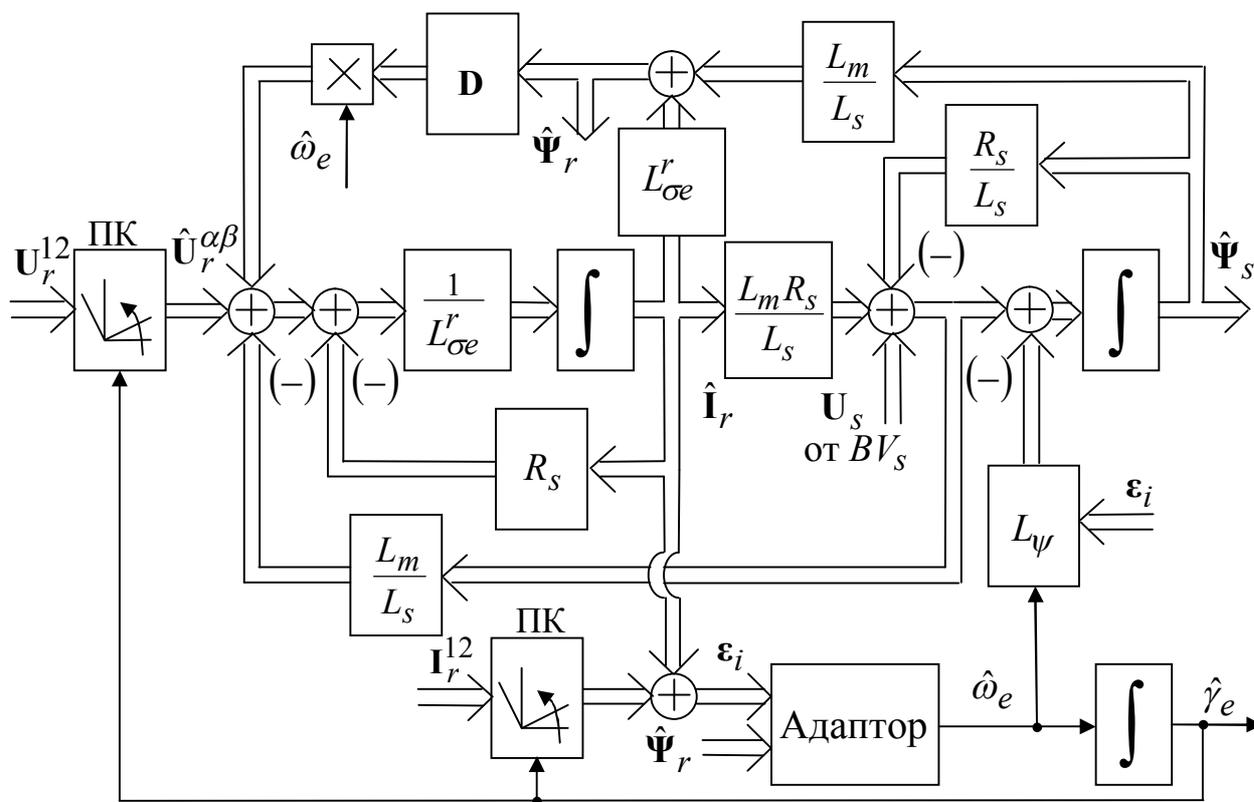


Рисунок 7 – Структурная схема алгоритма оценивания координат АСМ

Обобщенная структурная схема алгоритмов оценивания, содержащих наблюдатель полного порядка вида (2), представлена на рисунке 9.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования бездатчикового асинхронного ЭП с векторным управлением, представлены результаты исследования чувствительности алгоритма оценивания с эталонной моделью к отклонениям параметров машины. Экспериментально исследован известный адаптивный НПП и предлагаемый алгоритм оценивания. Фотография экспериментального стенда представлена на рисунке 10.

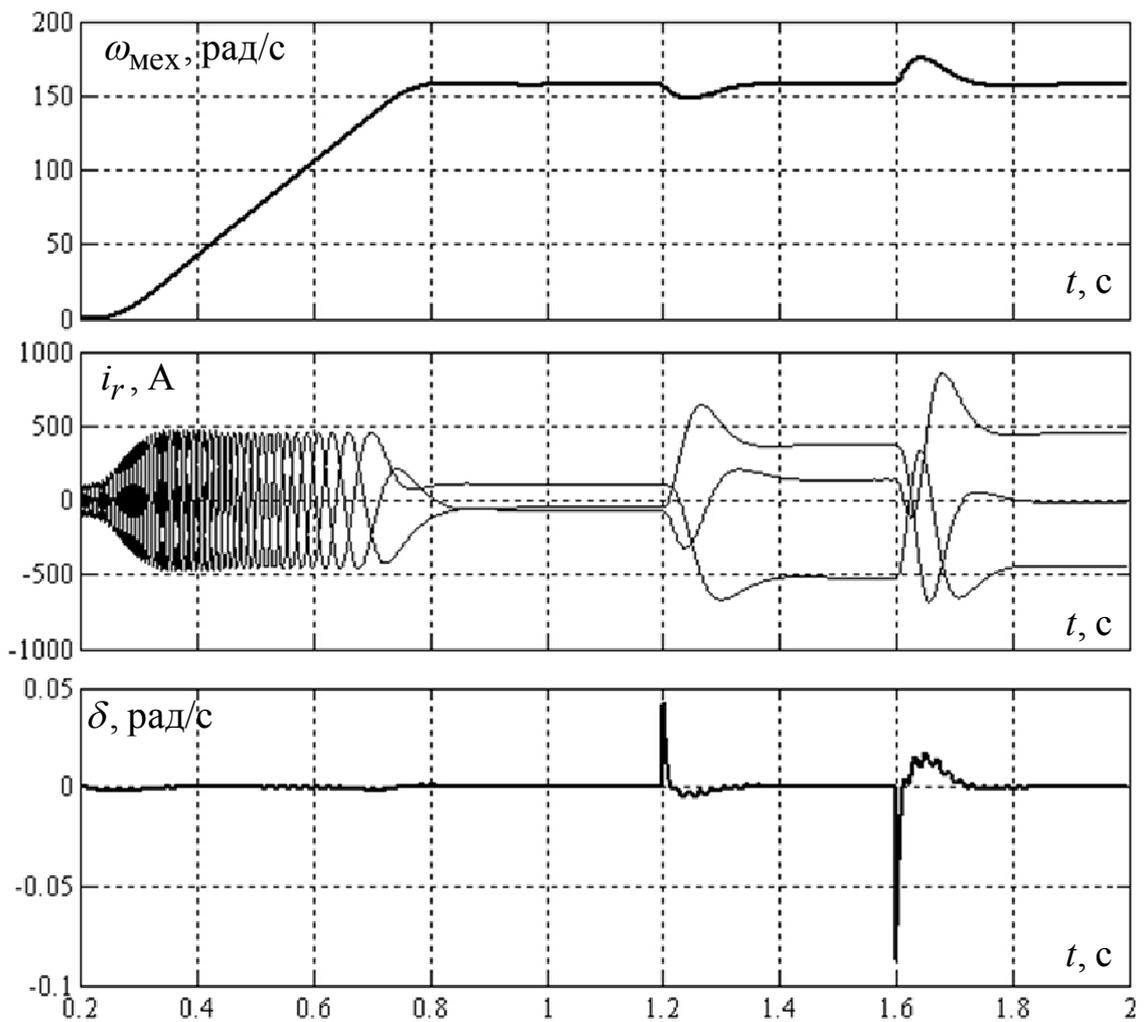


Рисунок 8 – Переходные процессы в ЭП по схеме АСМ

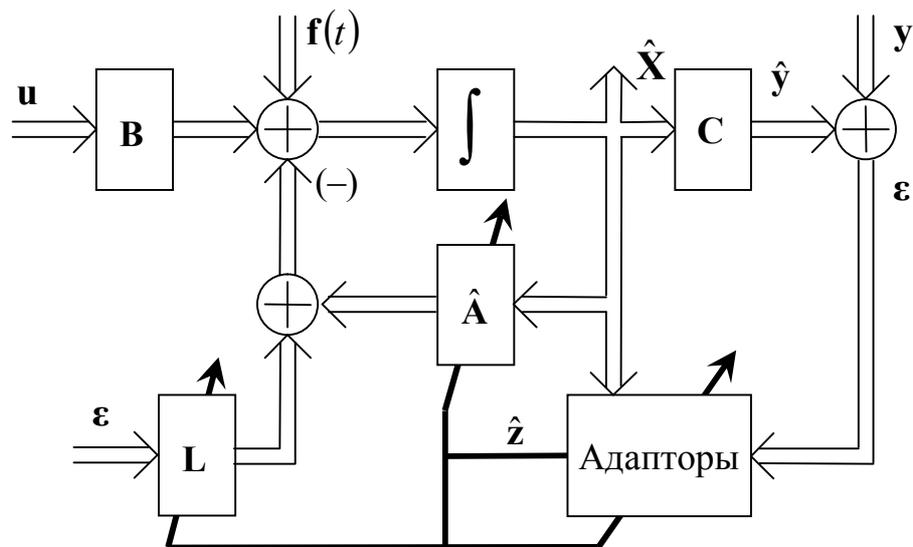


Рисунок 9 – Обобщенная структурная схема алгоритма оценивания с НПП



Рисунок 10 – Экспериментальный стенд

Результаты экспериментов позволили выявить области неустойчивой работы известных адаптивного НПП и алгоритма типа АСЗМ, которые подтверждают теоретические выкладки главы 2. Подтверждена работоспособность предлагаемого алгоритма оценивания в областях плоскости механических характеристик, которые ранее были недостижимы для бездатчиковых асинхронных ЭП, в диапазоне регулирования скорости до 100:1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили получить следующие основные результаты.

1. Разработаны адаптивные алгоритмы текущего оценивания опорного вектора потокосцеплений, частоты вращения и активного сопротивления статора АДКЗР и неявнополюсного СДПМ, формально отличающиеся от известных работоспособностью во всех четырех квадрантах плоскости механических ЭП без инъекции в двигатель дополнительных тестовых воздействий.

2. Разработан аналогичный указанным выше новый глобально устойчивый пассивный алгоритм оценивания вектора потокосцеплений статора и частоты вращения АСМ.

3. Предложены методики расчета параметров разработанных алгоритмов, обеспечивающие требуемое качество процессов адаптации.

4. На основе вышеперечисленных результатов сформулирована обобщенная методика структурно-параметрического синтеза глобально устойчивых адаптивных алгоритмов оперативного оценивания координат и параметров электрических машин переменного тока в условиях измерений только электрических величин на выходных клеммах преобразователя частоты. Определены рациональные формы представления математических моделей электрических машин для решения задач текущего оценивания.

5. Предложен новый высокоэффективный алгоритм автоматической предварительной идентификации параметров АДКЗР в системах частотно-регулируемого электропривода, который может быть совмещен с предварительным намагничиванием двигателя. Предъявлены требования к средствам измерения токов и напряжений, обеспечивающие достаточную точность определения параметров машины.

Разработанные алгоритмы оценивания в качестве настраиваемой модели используют наблюдатели электромагнитных процессов полного порядка и синтезированы на основе метода функций Ляпунова. Их главное свойство, заключающееся в теоретической устойчивости во всех режимах работы электропривода, достигнуто благодаря целенаправленному выбору соотношений весовых коэффициентов функции Ляпунова и элементов матриц «стабилизирующих» добавок наблюдателя. Настраиваемые модели не содержат «открытых» интеграторов, что позволяет избежать динамической «коррекции нулей» и формально не ограничивает достижимый диапазон регулирования ЭП. Разработанные алгоритмы позволяют при использовании типовых измерительно-информационных средств общепромышленного ЭП с цифровым управлением добиться значительного расширения диапазона регулирования и рекомендуются к широкому применению в новых разработках. На примере модельного ЭП с АДКЗР мощностью 55 кВт показано, что при применении датчиков тока и напряжения класса точности 0,1 и погрешности их обработки 1,0 % диапазоны регулирования должны составить не менее 100...150:1.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в расширении множества настраиваемых параметров наблюдателя, более полном учете характеристик намагничивания двигателей, распространении предложенного подхода на другие типы электроприводов.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов.**

1. Вдовин В.В. Глобально устойчивый адаптивный наблюдатель для систем общепромышленного асинхронного электропривода / В.В. Панкратов, В.В. Вдовин, С.С. Доманов, Г.Г. Ситников // Электротехника. – 2011. – №6. – С.42 – 47.
2. Вдовин В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода / В.В. Вдовин, В.В. Панкратов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. Энергетика. – Томск: Изд-во ТПУ. – С. 147 – 153.
3. Вдовин В.В. Адаптивный наблюдатель координат для бездатчикового магнитоэлектрического синхронного электропривода / В.В. Вдовин, В.В. Панкратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 70 – 74.
4. Вдовин В.В. Адаптивный алгоритм вычисления координат для бездатчикового векторного управления машинами двойного питания / В.В. Вдовин, Д.А.

Котин, В.В. Панкратов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – №6. – С. 23 – 27.

**Прочие публикации.**

5. Вдовин В.В. Алгоритмы векторного управления общепромышленным электроприводом / В.В. Вдовин, В.А. Вдовин // Наука. Технологии. Инновации: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Часть 3. – С. 246 – 247.
6. Вдовин В.В. Алгоритм текущей идентификации координат состояния в бездатчиковых асинхронных электроприводах // Наука. Технологии. Инновации: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 2. – С. 185 – 186.
7. Вдовин В.В. Глобально устойчивый алгоритм текущей идентификации координат в бездатчиковых асинхронных электроприводах / В.В. Вдовин, В.В. Панкратов // Автоматизированные электромеханические системы: сб. научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 45 – 55.
8. Вдовин В.В. Алгоритм идентификации координат состояния и сопротивления статора в асинхронном электроприводе // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 420 – 421.
9. Вдовин В.В. Разработка интеллектуальных устройств силовой электроники на кафедре электропривода НГТУ / В.В. Вдовин, С.С. Доманов, В.А. Мельников, Г.Г. Ситников, В.В. Панкратов // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 183 – 187.
10. Вдовин В.В. Адаптивный наблюдатель координат состояния для бездатчикового асинхронного электропривода / В.В. Вдовин, В.В. Панкратов // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 187 – 191.
11. Берестов В.М. Частотно-регулируемый электропривод с резервным питанием от сети постоянного тока / В.М. Берестов, В.В. Вдовин, В.Ю. Волков, С.С. Доманов, В.А. Клан, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // Электроприводы переменного тока: Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2012. – С. 43 – 47.
12. Берестов В.М. Инженерная методика расчета синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ / В.М. Берестов, В.В. Вдовин, С.С. Доманов, В.В. Панкратов, Г.Г. Ситников // Электроприводы переменного тока: Труды Международной пятнадцатой научно-технической

- конференции. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2012. – С. 167 – 171.
13. Вдовин В.В. Адаптивный наблюдатель скорости и положения ротора магнитоэлектрического синхронного двигателя для систем бездатчикового электропривода / В.В. Вдовин, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 (Иваново, 2 – 4 октября 2012 г.). – Иваново: ИГЭУ, 2012. – С. 395 – 400.
  14. Вдовин В.В. Адаптивный наблюдатель координат состояния для бездатчикового векторного управления асинхронизированной синхронной машиной / В.В. Вдовин, В.В. Панкратов // Труды V Всероссийской научно-практич. конф. «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» АЭПЭ-2012. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. – С. 27 – 35.
  15. Вдовин В.В. Электроприводы двойного питания для шахтных подъемных машин / В.А. Отченаш, В.В. Панкратов, Д.А. Котин, В.В. Вдовин, С.С. Доманов, Г.Г. Ситников // Труды V Всероссийской научно-практической конф. «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» АЭПЭ-2012. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. – С. 94 – 101.
  16. Вдовин В.В. Алгоритмы пассивной текущей идентификации для бездатчиковых электроприводов переменного тока / В.В. Вдовин // Конкурс молодежных научно-исследовательских работ: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 49 – 50.
  17. Vdovin V.V. State Observer for Sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Motor / V.V. Vdovin, D.A. Kotin, V.V. Pankratov // Proceedings of 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013). – Erlagol, Altai, July 1 – 5, 2013, pp. 382 – 388.
  18. Вдовин В.В. Методика синтеза алгоритмов вычисления координат состояния и параметров сложных динамических объектов на основе наблюдателей полного порядка / В.В. Вдовин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – №7 – Типография ООО «Импекс», г. Екатеринбург, 2013. – С. 6 – 10.

Подписано в печать «06» марта 2014 г. Формат 60x84x1/16  
Бумага офсетная. Тираж 120 экз. Печ. л. 1.25.  
Заказ №170

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20