

На правах рукописи

Вишневский Владимир Ильич

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО НЕЧЁТКОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО
УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2016

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического управления электроприводами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Лазарев Сергей Александрович,

Официальные оппоненты: **Козярук Анатолий Евтихиевич,**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный минерально-
сырьевой университет «Горный», кафедра
электроэнергетики и электромеханики,
заведующий кафедрой;

Андреев Николай Кузьмич,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
энергетический университет», кафедра
«Приборостроение и автоматизированный
электропривод», профессор.

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва.**

Защита состоится «14» октября 2016 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, (учебный корпус № 3), зал заседаний учёного совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан  августа 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.302.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Создание высококачественных систем управления асинхронным электроприводом предполагает решение целого ряда самостоятельных задач, таких как: создание надежных и экономичных силовых преобразователей напряжения и тока, разработка математического аппарата и методов анализа статических и динамических режимов работы электропривода, выявление законов управления при заданных критериях управления.

В современной методологии управления асинхронным электроприводом можно выделить основные подходы: векторное управление; системы с прямым управлением моментом; прогнозирующее управление; управление на базе скользящих режимов; управление, построенное на базе искусственного интеллекта.

Векторное управление теоретически позволило достигнуть в асинхронном электроприводе тех же регулировочных характеристик, что и в электроприводе постоянного тока. При синтезе законов векторного управления асинхронным электроприводом применяются хорошо зарекомендовавшие линейные принципы подчинённого регулирования, согласно которым синтез управляющего устройства проводится последовательно, начиная с контура регулирования тока. Значительный вклад в разработку векторного управления внесли зарубежные и отечественные учёные Blaschke F., Holtz J., Depenbrock M., Kubota R., Marino R., Novotny D., Varambones O., Dodds J. S., Браславский И. Я., Виноградов А. Б., Уткин В. И., Завьялов В. М., Панкратов В. В., Поляков В. Н., Донской Н. В., Рудаков В. В., Соколовский Г. Г., Шрейнер Р. Т., Усольцев А. А. Основными недостатками алгоритмов векторного управления являются: большой объем вычислений при прямом и обратном координатном преобразовании; наличие запаздывания в формировании электромагнитного момента; снижение количества управляемых переменных, так как намагничивающую составляющую статорного тока делают постоянной. Векторное управление не в полной мере учитывает особенности асинхронного электропривода как многосвязной нелинейной системы: неточно известные и меняющиеся во времени сопротивления ротора и статора, индуктивности статора и ротора, взаимные индуктивности асинхронного электродвигателя, имеющие нелинейную зависимость от тока намагничивания по причине насыщения магнитной системы. Асинхронный электропривод функционирует в условиях переменного момента инерции механизма и динамического момента нагрузки. При вариациях параметров асинхронного электродвигателя невозможно обеспечить компенсацию взаимного влияния контуров регулирования без специальных средств. При этом параметры регуляторов формируются из условий наихудшего набора параметров объекта.

Указанные недостатки исключены в алгоритмах прямого управления моментом (Direct Torque Control - DTC), разработанных учёными Depenbrock V., Takahashi I., Noguchi T. Развитие алгоритмов прямого управления моментом получило в работах Jezernik K., Liu Y., Nash J.N., Vas P., Kazmierkowski P., Браславского И. Я., Завьялова В. М., Козярука А. Е., Виноградова А. Б. Однако недостатками указанного алгоритма считаются пульсации в электромагнитном

момента и потокосцеплении асинхронного электродвигателя, которые повышают электропотребление и снижают точность регулирования скорости. Задачи локальной оптимизации, основанные на поиске экстремумов минимальной потребляемой мощности, имеют сложное решение, когда в качестве дополнительного критерия управления принята точность поддержания какого-либо параметра управления.

Для решения задачи управления необходимо обеспечить оценку вектора переменных состояния по его наблюдаемым компонентам. В системах векторного управления асинхронным электроприводом источниками ошибок при формировании результирующих управляющих векторов токов и напряжений являются неточности в определении опорного вектора потокосцепления в статорной системе координат. Для устранения этой неточности широко используются адаптивные наблюдатели с настраиваемой моделью асинхронного двигателя, наблюдатели полного порядка. Все перечисленные методы связаны со сложными вычислениями и потерей работоспособности при значительном дрейфе параметров объекта управления.

Степень разработанности. Достаточно общие результаты в задачах управления асинхронными электроприводами в условиях неопределённостей получены с использованием теории адаптивного управления и теории сложных систем: методов скоростного градиента, поисковых методов, теории систем с переменной структурой, методов экспериментального оценивания с применением теории нечёткой логики и нейронных сетей, теории робастной устойчивости и управления.

Теория систем с переменной структурой получила применение в асинхронном электроприводе благодаря практической реализуемости, высокому качеству процессов управления и инвариантности алгоритмов с переменной структурой по отношению к внешним возмущениям. Недостатком систем управления, разработанных на базе скользящих режимов, является снижение работоспособности системы при параметрическом дрейфе в широком диапазоне. В некоторых разработках задача синтеза адаптивных систем управления асинхронным электроприводом решена с использованием поисковых алгоритмов и алгоритмов скоростного градиента. Практическая реализация поисковых алгоритмов наряду с процедурой идентификации осложняется отсутствием возможности нахождения аналитического выражения управляющей функции.

Наличие теоретических исследований в области нечёткой логики и нейросетевой технологии, практическое внедрение этих направлений в сочетании с классической теорией автоматического управления открывают возможности разработки методов адаптивного управления асинхронным электроприводом. Нечёткие регуляторы доказали эффективность использования в статических режимах работы асинхронного электропривода. За кадром исследований в плане построения нечётких законов управления асинхронным электроприводом остались некоторые привлекательные методы: построение нечётких регуляторов на основе идей, заложенных в системах с переменной структурой управления; обучающие градиентные алгоритмы многосвязных систем. При определённых

допущениях нечёткие системы обладают свойством аппроксимировать нелинейную функцию с достаточной степенью точности. Это свойство позволяет создавать адаптивные системы с управлением, аппроксимированным нечётким регулятором.

Разработка методов управления должна производиться исходя из совокупности требований: диапазон регулирования скорости, точность поддержания заданной скорости, работоспособность при малых скоростях, полоса пропускания электропривода, инвариантность к неопределенностям параметров и внешним воздействиям, минимизация энергопотребления в динамических и статических режимах, бездатчиковое управление, минимизация объема вычислений.

Целью работы является разработка метода и алгоритма адаптивной бездатчиковой системы управления асинхронным электроприводом с высоким качеством процессов управления, построенной на базе теории нечёткой логики и преднамеренного введения скользящего режима в условиях параметрической неопределённости и внешних возмущений в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма.

Объектом исследования является бездатчиковый асинхронный электропривод в условиях параметрической неопределённости и внешних возмущений в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы управления в бездатчиковом асинхронном электроприводе, функционирующем в условиях параметрической неопределённости, внешних возмущений в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма.

Сформулируем совокупность задач, решаемых при разработке системы управления асинхронным электроприводом и рассмотренных в главах диссертационной работы.

1. Разработать наблюдатель оценки переменных состояния асинхронного электропривода на основе преднамеренной организации скользящего режима с учётом особенностей построения бездатчиковой системы управления асинхронным электроприводом.

2. Разработать адаптивный закон управления асинхронным электроприводом с применением скользящих режимов управления в условиях параметрической неопределённости, внешних возмущений в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма.

3. Провести синтез системы управления асинхронным электроприводом, построенной на основе скользящих режимов управления в условиях параметрической неопределённости и внешних возмущений в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма.

4. Разработать метод и алгоритм адаптивной бездатчиковой системы управления асинхронным электроприводом с переменным моментом нагрузки и нестационарным моментом инерции механизма на базе адаптивно настраиваемых нечетких регуляторов.

Методы и методология проведения исследования. При решении поставленных задач использовались анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований, математическое моделирование. Результаты диссертационной работы обоснованы математически с использованием теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, современной теории автоматического управления, теории нелинейных систем с разрывным управлением, теории асимптотических наблюдателей, теории устойчивости методом функций Ляпунова, современной теории управления асинхронным электроприводом.

Степень достоверности полученных научных положений и выводов подтверждена близкой сходимостью теоретических и экспериментальных исследований с применением пакета прикладных программ SIMULINK в среде MATLAB, разработанных и внедрённых законов управления в цифровой системе управления высоковольтного преобразователя частоты серии ЭСН на напряжения 6-10кВ и мощностью до 5000 кВт, обоснованностью принятых допущений, сопоставлением полученных результатов в сравнение с результатами, достигнутыми другими авторами.

Положения, выносимые на защиту.

1. Адаптивный скользящий наблюдатель асинхронного электропривода, который позволяет получить оценку электрической угловой скорости ротора и вектора потока ротора асинхронного электродвигателя при параметрическом дрейфе для построения эффективных законов бездатчикового управления в асинхронном электроприводе.

2. Система адаптивного скользящего режима управления асинхронным электроприводом, которая позволяет получить высокое качество процессов управления в асинхронном электроприводе за счёт адаптивной настройки параметров разрывной функции управления к внешним возмущениям в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма.

3. Метод адаптивного нечёткого режима управления скоростью асинхронного электропривода, позволяющий получить эффективный закон управления скоростью при неизмеримости динамического момента нагрузки и переменном моменте инерции механизма.

4. Алгоритм адаптивной настройки параметров нечёткого регулятора нечёткой системы управления асинхронным электроприводом, который обеспечивает эффективное управление в условиях неизмеримости внешних возмущений в виде динамического момента нагрузки и нестационарности момента инерции механизма.

Научная новизна.

1. Разработан адаптивный скользящий наблюдатель вектора потокосцепления и электрической угловой скорости ротора асинхронного электродвигателя, отличающийся от разработанных ранее тем, что построен на сравнении выходов двух одновременно настраиваемых скользящих наблюдателей потокосцепления ротора и позволяет определить закон адаптации к изменениям параметров в простой форме.

2. Синтезирована математическая модель асинхронного электропривода с нестационарными параметрами в виде дифференциальных уравнений слежения ошибок скорости и потокосцепления ротора, которая учитывает динамическое отклонение вектора потока ротора асинхронного электродвигателя, представленного в виде неявной математической модели.

3. Разработан адаптивный закон настройки параметров разрывной функции скользящего режима управления асинхронным электроприводом, который позволяет обеспечить эффективную сигнальную и параметрическую адаптацию к внешним возмущениям в виде динамического момента нагрузки и переменного момента инерции механизма.

4. Разработаны метод и алгоритм настройки параметров нечёткого регулятора адаптивной нечёткой системы управления скоростью асинхронного электропривода, который представлен в виде аппроксимированной нечёткой модели в условиях неизмеримости момента нагрузки и переменного момента инерции механизма.

Теоретическая значимость результатов исследования состоит в дальнейшем расширении границ применения теории скользящих режимов управления, использования теории нечёткой логики для решения задач регулирования скорости асинхронного электропривода в условиях нестационарности параметров асинхронного электродвигателя и неизмеримости внешних возмущений в виде переменного нагрузочного момента и вариаций приведённого момента инерции механизма.

Практическая значимость результатов исследований.

1. Разработанный наблюдатель регулируемых координат асинхронного электропривода использован для построения высоковольтного асинхронного электропривода серии ЭСН с целью повышения технических характеристик асинхронных электроприводов: увеличение диапазона регулирования скорости, повышение точности поддержания заданной скорости, работоспособности при малых скоростях, инвариантности к неопределенностям параметров и внешним воздействиям.

2. Использование разработанного наблюдателя оценки постоянной времени ротора и активного сопротивления статора асинхронного электродвигателя позволяет обеспечить параметрическую адаптацию в структурах векторного управления асинхронным электроприводом.

3. Методика построения адаптивного нечёткого режима управления и разработанный на его базе пошаговый алгоритм формирования управляющей функции с адаптивно настраиваемым нечётким регулятором могут быть использованы для решения задач управления асинхронным электродвигателем в условиях нестационарности параметров асинхронного электродвигателя и неизмеримости внешних возмущений в виде переменного нагрузочного момента и изменения приведённого момента инерции механизма.

Реализация результатов диссертации. Разработанные методы построения системы управления, алгоритмы управления и наблюдения переменных состояния асинхронного электропривода были использованы в процессе разработки

базового программного обеспечения цифровой системы управления высоковольтного преобразователя частоты серии ЭСН на напряжения 6-10кВ на мощности до 5МВт. Разработка проводилась в рамках реализации научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы с ОАО «АК «Транснефть» «Разработка высоковольтного преобразователя частоты на напряжения 10кВ и мощности до 2.5 МВт для регулирования скорости электродвигателей магистральных насосных агрегатов». Высоковольтные преобразователи частоты серии ЭСН успешно эксплуатируются в ОАО «АК «Транснефть»: НПС «Крымская» (асинхронный электропривод магистральных насосов 630кВт, 6кВ), НПС «Горький» (асинхронный электропривод подпорных насосных агрегатов 800 кВт, 10кВ), НПС «Краноармейская-2» (асинхронный электропривод подпорных насосных агрегатов 2500кВт, 10кВ), НПС «Пермь» (асинхронный электропривод магистральных насосных агрегатов 800кВт, 10кВ); в ООО «Иркутская нефтяная компания» (асинхронный электропривод насосов подготовки нефти 315кВт, 6кВ).

Апробация диссертационной работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на научно-практических конференциях различного уровня:

– международных: «V Международная конференция по автоматизированному электроприводу» АЭП 2007, г. С.-Петербург, 2007 г., VIII Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП 2014, г. Саранск, 2014 г.;

– российских: техническая конференция «Рассмотрение основных технических решений по повышению надёжности энергоснабжения технологических объектов на основании опыта эксплуатации, реконструкции и строительства энергоустановок предприятий ОАО «СИБУР Холдинг», г. Геленджик, 2010 г., технико-практическая конференция «Энергоснабжение и энергоэффективность. Высоковольтная преобразовательная техника» г. Чебоксары, 2014г., конференция Ассоциации энергетиков топливно-энергетического комплекса «Новое энергетическое оборудование для нефтяной и газовой промышленности» г. Чебоксары 2014 г.;

– на заседаниях кафедры «Системы автоматического управления электроприводами» ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова».

Публикации. Результаты исследований нашли отражение в статьях, тезисах докладов, опубликованных автором (всего 12 работ, 5 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ).

Структура и объем диссертации определены логикой и последовательностью решения поставленных задач. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 119 наименований и приложений, включает 186 страниц машинного текста, 61 рисунок и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности исследуемой проблемы; обозначены цель, объект, предмет исследования; сформулированы задачи исследования, его методологические и теоретические основы; раскрывается научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость; представлены сведения об апробации и внедрении результатов эксперимента; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы представлена детализация поставленных задач управления асинхронным электродвигателем, её формализация и обоснование методов решения. Представлен обзор существующих стратегий управления асинхронным электроприводом для обоснования побудительных мотивов проведения настоящего исследования, используемого математического аппарата и развиваемых методов в современной теории управляемого асинхронного электропривода. Обоснованы принимаемые математические модели асинхронного электродвигателя для проведения исследования. Представлены принципы синтеза контуров регулирования скорости в современных системах управления электроприводами. Проведён анализ современных методов оценки скорости вращения ротора, амплитуды потока ротора, статора и главного вектора потокосцепления ротора в современных системах управления асинхронным электродвигателем в условиях параметрической неопределённости.

Вторая глава посвящена решению задач разработки адаптивного наблюдателя регулируемых координат: электрической угловой скорости вращения ротора и вектора потокосцепления ротора, параметрической идентификации активного сопротивления статора и постоянной времени ротора на основе преднамеренной организации в системе управления скользящего режима. Наблюдатель разработан с учётом особенностей построения систем бездатчикового векторного управления асинхронным электроприводом в условиях параметрической неопределённости.

Для решения задачи инвариантности к параметрической неопределённости в асинхронном электроприводе используется подход, основанный на введении в контур обратной связи наблюдателей переменных состояния на скользящих режимах. Данный класс наблюдателей позволяет решить задачу оценивания не измеряемых фазовых переменных и имеющихся неопределённостей, а также позволяет синтезировать комбинированное управление для их компенсации. Для информационной поддержки исследуемых законов управления разработана процедура синтеза наблюдателей переменных состояния на скользящих режимах, позволяющих за конечное время решить задачу непосредственного оценивания вектора переменных состояния асинхронного электропривода.

Исследование асинхронного электродвигателя как объекта регулирования рассматривается в стационарной системе координат в виде

$$\begin{bmatrix} p\mathbf{i} \\ p\boldsymbol{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \boldsymbol{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_s^s + \boldsymbol{\chi},$$

$$\text{где } \mathbf{A}_{11} = -\frac{R_s + R'_r}{\sigma L_s} \mathbf{I}, \mathbf{A}_{12} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{R'_r}{M} \mathbf{I} - \omega \mathbf{J} \right], \quad \mathbf{A}_{21} = R'_r \mathbf{I}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{22} = -\frac{R'_r}{M} \mathbf{I} + \omega \mathbf{J}, \quad \mathbf{B}_1 = \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{I} \quad - \text{матрицы коэффициентов; } R'_r = R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \quad - \text{приведённое}$$

сопротивление ротора; $\Psi_r = \frac{L_m}{L_r} \Psi_r^s$, $M = \frac{L_m^2}{L_r}$; $\mathbf{u}_s^s = [u_{sa}^s u_{sb}^s]^T$ – вектор напряжения

двухфазной эквивалентной машины, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$, $\chi = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{A}_{11} & \Delta \mathbf{A}_{12} \\ \Delta \mathbf{A}_{21} & \Delta \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \Psi_r \end{bmatrix}$ – неизвестный

вектор, характеризующий неопределённости в асинхронном электроприводе, $\mathbf{i} = [i_{sa}^s i_{sb}^s]^T$ – вектор тока статора и $\Psi_r^s = [\Psi_{ra}^s \Psi_{rb}^s]^T$ – вектор потока ротора в ортогональной системе координат, L_s, L_r, R_s, R_r – параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, $\omega = \omega_s - \omega_r$ – электрическая угловая скорость ротора, ω_r – частота роторной ЭДС, ω_s – синхронная частота статора.

В основе построения скользящего наблюдателя заложена идея декомпозиции задачи оценки потока ротора и тока статора на две независимые задачи меньшей размерности за счёт преднамеренной организации скользящего режима и использования свойств скользящих движений, что движение в скользящем режиме инвариантно к линейному преобразованию исходного вектора управления. Обеспечен выбор поверхности разрыва и изменено управление для преобразования уравнения модели асинхронного двигателя относительно вектора ошибки $\mathbf{e}_{i1} = [e_{ias} \ e_{ibs}]^T$ к виду, для которого удаётся составить функцию Ляпунова и обеспечить устойчивость траекторий управляемых переменных, где \mathbf{e}_{i1} ($e_{ias} = \hat{i}_{sa} - i_{sa}$, $e_{ibs} = \hat{i}_{sb} - i_{sb}$) – ошибка оценки и измеренного значения тока статора в неподвижной относительно статора системе координат.

Для построения робастной структуры наблюдателя вектора потока ротора и электрической угловой скорости ротора разработан скользящий наблюдатель на базе интегрированной структуры двух адаптивно настраиваемых скользящих наблюдателей тока: базовой модели СН1, не содержащей параметрические неопределённости, и настраиваемой модели СН2, зависящей от параметрической неопределённости асинхронного электродвигателя (рисунок 1). Структура наблюдателя, состоящая из двух моделей электродвигателя, замкнута обратными связями по ошибке тока статора и отклонениями интегральных оценок потокосцеплений ротора. Согласно теореме Ляпунова об асимптотической устойчивости во всём пространстве наблюдения при возмущениях ограниченных в допустимой области получен закон идентификации угловой скорости ротора и потокосцепления ротора

$$\tilde{\omega} = p^{-1} \left[-\frac{\mathbf{A}_{12} k_s}{\sigma L_s d} \mathbf{J} \tilde{\Psi}_r (\mathbf{A}_{22} (\tilde{\Psi}_r - \hat{\Psi}_r)) \right], \quad p \tilde{\Psi}_r = \mathbf{A}_{21} \tilde{\mathbf{i}} + (-\sigma L_s \mathbf{U}_2^{eq} + \mathbf{U}_1^{eq}),$$

где $d = \det[\mathbf{A}_{12}]$, $k_s > 1$ – коэффициент квадратичного функционала Ляпунова.

При практической реализации закона оценивания угловой электрической скорости ротора $\tilde{\omega}$ в качестве элемента адаптации использован пропорционально-интегральный регулятор с коэффициентами пропорциональной K_p и интегральной K_I части

$$\tilde{\omega} = K_p (\tilde{\psi}_{rb} \hat{\psi}_{ra} - \tilde{\psi}_{ra} \hat{\psi}_{rb}) + K_I p^{-1} (\tilde{\psi}_{rb} \hat{\psi}_{ra} - \tilde{\psi}_{ra} \hat{\psi}_{rb}).$$

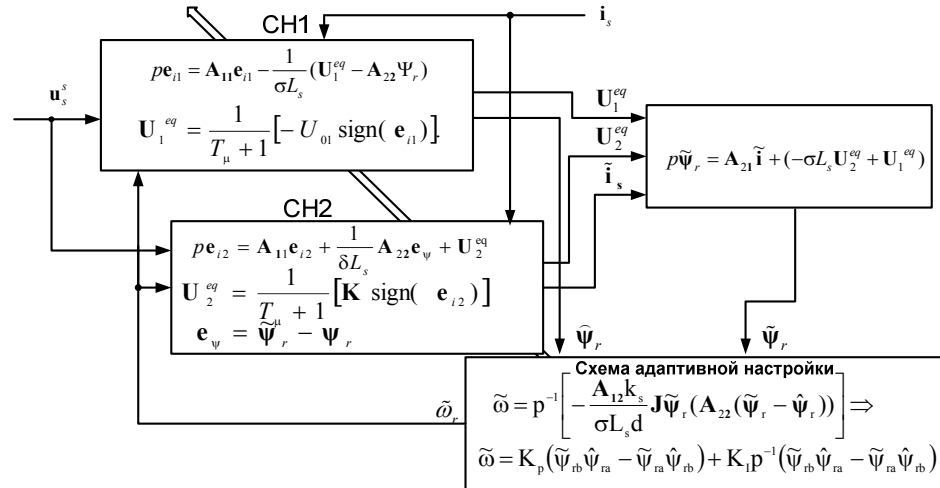


Рисунок 1 – Функциональная схема адаптивного наблюдателя потока ротора и скорости вращения ротора.

В алгоритмах косвенного векторного управления контур задания частоты ротора является разомкнутым, а его вычисление зависит от постоянной времени ротора асинхронного электродвигателя T_r : $\omega_r = i_{s\beta} L_m / (T_r \Psi_{r\alpha})$. Дрейф T_r и неточность априорной информации постоянной времени ротора приводят к появлению ошибки в вычислении результирующей электрической угловой скорости ротора, чувствительности асинхронного электропривода на изменяющуюся нагрузку, к нарушению принципа раздельного управления потоком и моментом асинхронного электропривода с векторным управлением (рисунок 2).

Задача управления асинхронным электроприводом в условиях

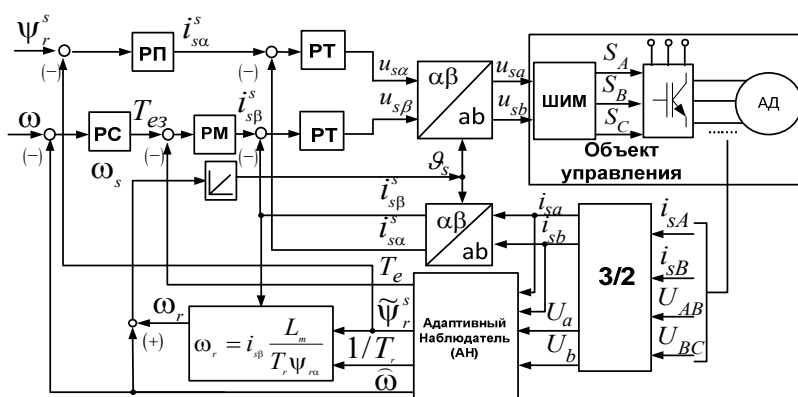


Рисунок 2 – Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

неопределённости параметров решается поэтапно: идентификация неизвестных параметров, а затем разработка алгоритма адаптивного управления для обеспечения целей управления. Задача идентификации постоянной времени ротора в скользящем наблюдателе решается с использованием метода Ляпунова и метода структурной декомпозиции, построенного на

основе допущения, что скорость процессов дрейфа параметров существенно медленнее во времени электродинамических процессов

$$p\mathbf{e}_i = \Delta\mathbf{A}_{11}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{12}\mathbf{e}_\psi + \Delta\mathbf{A}_{12}\widehat{\Psi}_r + \mathbf{B}_1\mathbf{u}_s + \mathbf{K}\operatorname{sgn}(\mathbf{e}_i),$$

где $\Delta\mathbf{A}_{11} = -\frac{\Delta R_s + \Delta R'_r}{\sigma L_s}\mathbf{I}$, $\Delta\mathbf{A}_{12} = \frac{1}{\sigma L_s}\left[\frac{\Delta R'_r}{M}\mathbf{I} - \omega\mathbf{J}\right]$ – матрица, учитывающая дрейф сопротивления статора и ротора. Производная от функции Ляпунова будет отрицательно определена, если параметрический идентификатор дрейфа активного сопротивления статора и постоянной времени ротора будет соответствовать выражению $\Delta\widehat{R}_s = \frac{k_s}{\sigma L_s}p^{-1}\mathbf{e}_i^T\mathbf{i}_s$, $\Delta\frac{1}{T_r} = \frac{k_r}{M\sigma L_s}p^{-1}\mathbf{e}_i^T\left(\mathbf{i}_s - \frac{\widehat{\Psi}_r}{M}\right)$.

В третьей главе, на основе использования методики настройки параметров разрывной функции управления, проводится теоретическое обоснование и дальнейшее развитие теории скользящих режимов управления в асинхронном электроприводе с подтверждением результатов путём математического моделирования. В работе использован синтез системы управления с неизмеряемыми возмущениями, в которой желаемые свойства, в том числе и инвариантность, достигаются за счет преднамеренного введения скользящих режимов с адаптивно настраиваемыми параметрами. Доказано, что для реализации условий инвариантности не требуется точная информация о возмущениях, о параметрах объекта или модели возмущения.

Для обеспечения целей управления $e_\omega = \lim_{t \rightarrow t_1} \|\omega(t) - \omega_s(t)\| = 0$, $\mathbf{e}_\psi = \lim_{t \rightarrow t_2} \|\Psi_r - \Psi_{r3}\| = 0$, $\mathbf{e}_{i_s} = \lim_{t \rightarrow t_3} \|\mathbf{i}_s - \mathbf{i}_{s3}\| = 0$ в асинхронном электроприводе использованы временная и структурная декомпозиции, позволяющие представить исходную систему в виде эквивалентных подсистем и допускающие отдельное рассмотрение регулирования тока статора, потокосцепления ротора и электромагнитного момента АД

$$\begin{aligned} p\mathbf{i}_s &= \mathbf{h} + \mathbf{B}\mathbf{u}_s^s, \\ p\mathbf{x}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, t)\mathbf{i}_s^s + \xi, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{h} = [h_{s\alpha} h_{s\beta}]^T$ – некоторая функция в системе координат, ориентированная по вектору потокосцепления ротора, представлена в виде проекций –

$$h_{s\alpha} = -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{s\alpha}^s + \frac{k_r L_m}{\sigma L_s L_r} |\Psi_r^{\alpha\beta}| + \omega_r i_{s\beta}^s, \quad h_{s\beta} = -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{s\beta}^s - \frac{k_r}{\sigma L_s L_r} p\omega |\Psi_r^{\alpha\beta}| - \omega_r i_{s\alpha}^s;$$

$\mathbf{u}_s^s = [u_{s\alpha}^s u_{s\beta}^s]^T$, $\mathbf{i}_s^s = [i_{s\alpha}^s i_{s\beta}^s]^T$ – вектор напряжения и тока статора, представленный в виде проекций токов; $p\mathbf{x}(t) = [p\Psi_r^{\alpha\beta}, p\omega]^T$ – матрица переменных доступных для

наблюдения, $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} q & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\Psi_r^{\alpha\beta}| \\ \omega \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (\sigma L_s)^{-1} & 0 \\ 0 & (\sigma L_s)^{-1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & m |\Psi_r^{\alpha\beta}| \end{bmatrix}$ – матрицы

идеального объекта управления, $\Psi_r^{\alpha\beta} = [\Psi_{r\alpha} \Psi_{r\beta}]$ – вектор потока ротора,

$\xi = [\Delta q |\Psi_r^{\alpha\beta}| - \Delta a \omega_r - z_p T_L / J]^T = [\Delta q |\Psi_r^{\alpha\beta}| \quad d]^T$ – нелинейная матрица, характеризующая внешнее воздействие и неточность описания объекта,

$q = -R_r/L_r$, $a = -f_c/J$, $k = R_r k_r$, $m = \frac{3z_p^2 k_r}{2J}$, f_c – коэффициент вязкого трения,

$\omega_m = \frac{\omega}{z_p}$ – механическая угловая скорость ротора, z_p – число пар полюсов

асинхронного электродвигателя. В динамических режимах вектор потока ротора $\widehat{\Psi}_r^s$ не коллинеарен эталонному вектору потока $\Psi_{r\alpha}^s = |\Psi_r^{\alpha\beta}| = \Psi_{r\alpha}$ ($\Psi_{r\beta} = 0$), относительно которого ориентирована ось абсцисс полярной системы координат, т.е. существует динамический угол ошибки θ (рисунок 3а). В структуре векторного управления асинхронным электроприводом (рисунок 2) траектории

движения тригонометрических функций $\cos(\theta) = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_{rm}}$, $\sin(\theta) = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{rm}}$ от угла ошибки

между вектором потока ротора Ψ_{rm} и эталонным вектором потока ротора $\Psi_{r\alpha}^s$ с желаемой траекторией движения находятся в зависимости от динамического момента нагрузки и переменного момента инерции механизма (рисунок 3б, 3в). Наличие динамического угла ошибки является следствием инерционности векторного закона регулирования при параметрических и внешних возмущениях, что приводит к динамической ошибке в траектории скорости, динамическому броску и колебаниям в электромагнитном моменте.

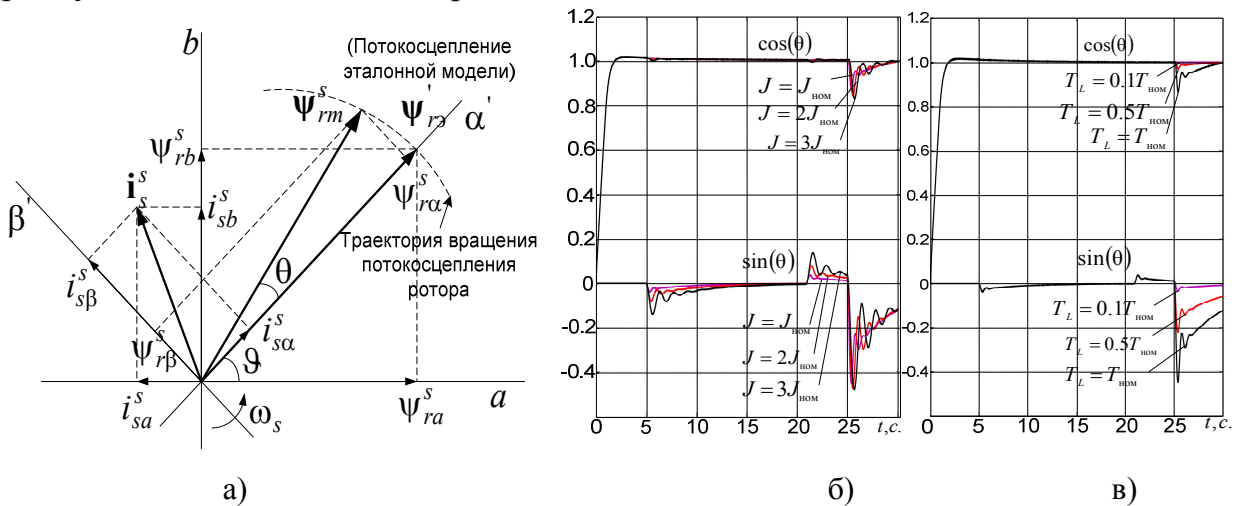


Рисунок 3 – а – векторная диаграмма системы косвенного векторного управления с учётом угла ошибки в динамическом режиме, графики тригонометрических функций от угла отклонения вектора потокосцепления ротора при изменении: б – момента инерции, в – динамического момента нагрузки

Для решения задачи управления синтезированы дифференциальные уравнения на подпространство ошибки управляемых переменных, в которых в явном виде присутствует параметр $\cos(\theta)$:

$$pe = p \begin{bmatrix} e_\psi \\ e_\omega \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{T_r} & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\psi \\ e_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_m}{T_r} \cos(\theta) & 0 \\ 0 & b \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_\psi \\ \xi_\omega \end{bmatrix},$$

где $\xi_\omega = b \left(\sin(\theta) - \frac{T_r \omega_r}{T_r p + 1} \right) i_{s\alpha} - \lambda - \Delta a e_\omega + \Delta b \sin(\theta) i_{s\alpha} + \Delta b \cos(\theta) i_{s\beta}$,

$\xi_\psi = \frac{L_m}{T_r} \sin(\theta) i_{s\beta} + \omega_r \sin(\theta) \psi_{rm}$ – результирующие параметры, характеризующие

внешнее воздействие, дрейф параметров, которые приняты квазистационарными и ограниченными областью допустимых значений $\forall \xi_e \in \Xi$,

$$\cos(\theta) = \frac{\Psi_{r\alpha}}{\Psi_{rm}}, \quad \sin(\theta) = \frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{rm}}, \quad a + \Delta a = \frac{f_c}{J}, \quad b + \Delta b = \frac{3}{2} \frac{z_p^2}{J} \frac{L_m}{L_r} \psi_{rm} = k \psi_{rm}, \quad \lambda = \frac{z_p T_L^*}{J} - \frac{z_p T_L}{J}.$$

Уравнение электромеханического равновесия (1) принято в качестве математического описания неявной эталонной модели при неполном измерении вектора состояния.

Решена задача инвариантности по отношению к неопределённости ξ при движении по многообразию $\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3]^T = \left[e_\psi \quad e_\omega + \int_0^t (k_2 + a) e_\omega(\tau) d\tau \quad e_{i_s} \right]^T$, а выбор коэффициентов $(k_2 + a) > 0$, определяет темп сходимости замкнутого контура регулирования скорости вращения ротора $p e_\omega = -(k_2 + a) e_\omega$ за некоторое конечное время t_1 . По результатам проведённого синтеза адаптивного режима управления асинхронным электроприводом методом функций Ляпунова получены адаптивные законы регулирования в структуре скользящего управления асинхронным электроприводом (рисунок 4а):

1) током статора $[u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T = [u_{s\alpha 0} \text{sign}(s_{3\alpha}) \quad u_{s\beta 0} \text{sign}(s_{3\beta})]^T$, где

$$\text{sign}(s_{3\alpha}) = \begin{cases} 1, & s_{3\alpha} > 0, \\ -1, & s_{3\alpha} < 0, \end{cases} \quad u_{s\alpha 0} \geq u_{s\alpha eq} = \left| -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{s\alpha}^s + \frac{k_r L_m}{\sigma L_s L_r} |\psi_r^s| + \omega_r i_{s\beta}^s - p i_{s\alpha}^s \right|,$$

$$\text{sign}(s_{3\beta}) = \begin{cases} 1, & s_{3\beta} > 0, \\ -1, & s_{3\beta} < 0, \end{cases} \quad u_{s\beta 0} \geq u_{s\beta eq} = \left| -\frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{s\beta}^s - \frac{k_r}{\sigma L_s L_r} p \omega |\psi_r^s| - \omega_r i_{s\alpha}^s - p i_{s\beta}^s \right|;$$

2) потокосцеплением ротора (СРП, рисунок 4а)

$$i_{s\alpha} = \theta_\psi \begin{bmatrix} e_\psi \\ \text{sign}(e_\psi) \end{bmatrix} = K e_\psi - |\gamma_\psi| \text{sign}(e_\psi), \quad \text{sign}(e_\psi) = \begin{cases} 1, & e_\psi > 0, \quad |\gamma_\psi| \geq \left| \frac{L_m}{T_r} \sin(\theta) i_{s\beta} + \omega_r \sin(\theta) \psi_{rm} \right| \\ -1, & e_\psi < 0, \end{cases} \quad K = \frac{1}{L_m \cos(\theta)};$$

3) угловой скоростью вращения ротора (СРС, рисунок 4а)

$$i_{s\beta} = (-k_2 e_\omega - \hat{\beta}_\omega \gamma_\omega \text{sign}(s_2(e_\omega))) / b, \quad \text{sign}(s_2(e_\omega)) = \begin{cases} 1, & s_2(e_\omega) > 0, \\ -1, & s_2(e_\omega) < 0. \end{cases}$$

Параметры γ_ψ (рисунок 4б), $\hat{\beta}_\omega$ (рисунок 4в) разрывных функций управления вычисляются из достаточных условий существования скользящих режимов и настраиваются в функции оценки возмущения, которые ограничены предельным возможным значением $\beta_\omega > \xi_\omega + \eta_\omega$, где $\eta_\omega > 0$ – положительная и постоянная константа. Для настройки разрывного управления $\hat{\beta}_\omega$ введён параметр $\tilde{\beta}_\omega$, характеризующий степень отклонения возмущения от предельно возможной величины возмущения $\tilde{\beta}_\omega = \hat{\beta}_\omega - \beta_\omega$ и соответствующий адаптивному закону

$p\tilde{\beta}_\omega = \gamma_\omega |s_2|$. Адаптивный скользящий режим управления с неявной эталонной моделью (НЭМ) (рисунок 4а) обеспечивает увеличение быстродействия системы в 4 раза на обработку возмущения в виде вариаций приведённого момента инерции и момента нагрузки в сравнении с векторным законом регулирования (рисунок 5а, 5г).

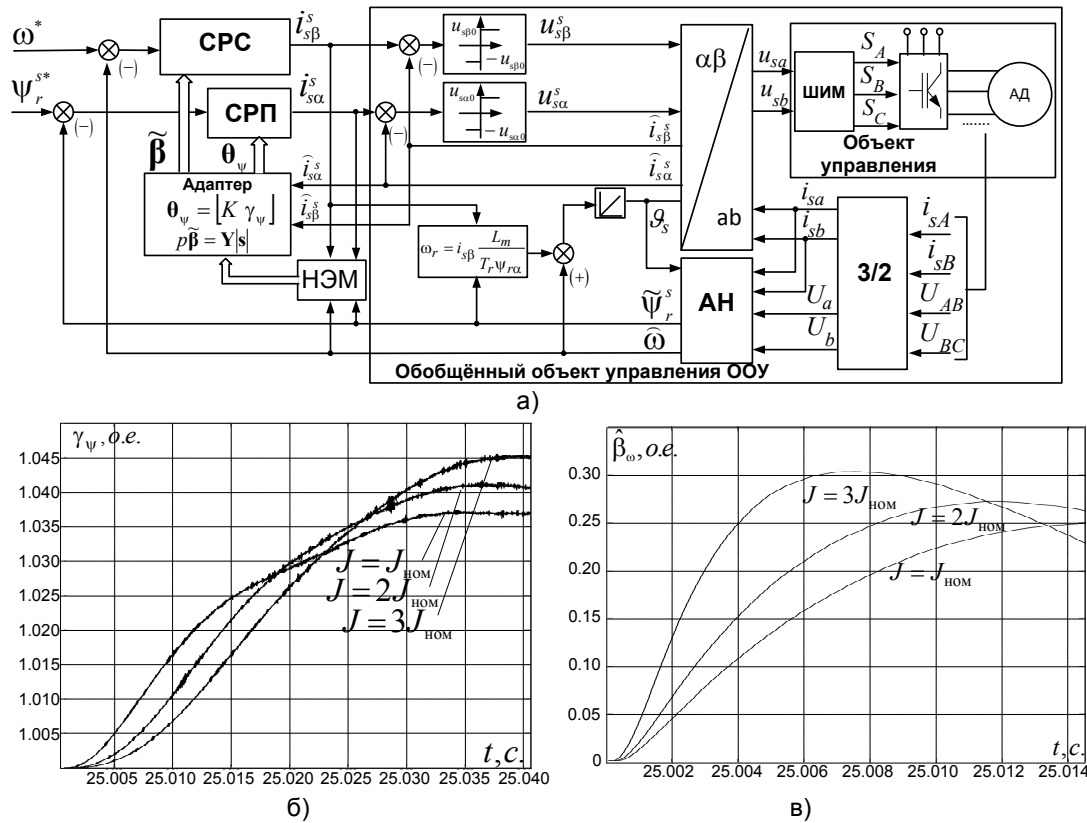


Рисунок 4 – а – Функциональная схема скользящего управления асинхронным электроприводом, б – настраиваемый параметр γ_ψ , в – адаптивно настраиваемый параметр $\hat{\beta}_\omega$ при динамическом моменте $T_L = T_{ном}$ и изменении $J = J_{ном} - 3J_{ном}$

Разработанная методика управления обеспечивает относительную статическую точность поддержания электрической угловой скорости ротора 1% (рисунок 5в, 5е), возможность сохранения стабильных динамических свойств асинхронного электропривода в диапазоне регулирования скорости 1/100 (рисунок 5а) при возмущениях в виде динамического момента нагрузки и вариациях приведённого момента инерции в пределах допустимых значений $\forall \xi_e \in \Xi$ (рисунок 5б, 5д).

Четвёртая глава диссертации состоит из трёх разделов. Первый раздел посвящён особенностям аппроксимации методами нечёткой логики нелинейных электромеханических систем, параметры которых неточно известны, и разработке методики адаптивной настройки нечёткого регулятора.

Во втором разделе разработана адаптивная нечёткая система управления скоростью асинхронного электродвигателя при наличии ограниченных возмущающих воздействий в виде переменного нагрузочного момента, вариаций момента инерции механизма и изменений параметров асинхронного электродвигателя в заданных пределах. В третьем разделе представлено

моделирование адаптивного нечёткого управления с наблюдателями скорости и потокосцепления ротора.

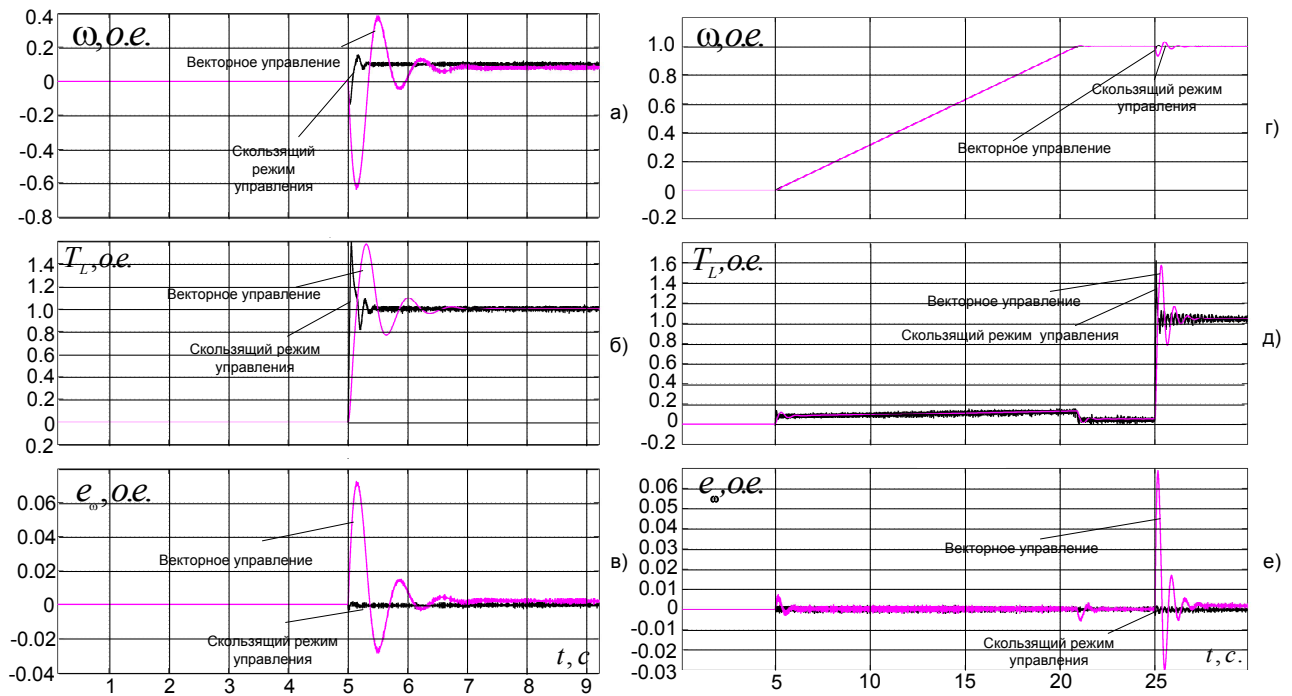


Рисунок 5 – Графики переходных процессов при классическом векторном и скользящем режиме управления при $T_L = T_{ном}$, $J = 3J_{ном}$ при $\omega_z = 0.01\omega_{ном}$: а – электрической угловой скорости ротора, б – электромагнитного момента, в – ошибки регулирования скорости; при $\omega_z = \omega_{ном}$, г – электрической угловой скорости, д – электромагнитного момента, е – ошибки регулирования скорости.

Нелинейная система представлена уравнением ошибки отклонения скорости ротора от желаемой траектории в виде

$$px(t) = -f(x,t) + g(x,t)u + \xi_\omega, \quad (2)$$

где $px(t) = pe_\omega$ – доступная для наблюдения ошибка слежения скорости ротора, $f(x,t) = (a_\omega + \Delta a)e_\omega = ae_\omega$, $g(x,t) = (b_\omega + \Delta b)\cos(\theta) = b\cos(\theta)$ – нестационарные функции с переменными параметрами, $u(i_{с\beta}^*)$ – управляющее воздействие в виде проекция тока

статора $i_{с\beta}^*$, $\xi_\omega = b\left(\sin(\theta) - \frac{T_r\omega_r}{T_r p + 1}\right)i_{с\alpha}^* - \lambda$ – неопределённость, характеризующая

внешнее воздействие. Согласно теории систем с переменной структурой достижение цели управления обеспечивается при выбранной поверхности разрыва s_2 управлением вида

$$u = u_{eq} + u_2 = g^{-1}(x,t)\left(-k_2 e_\omega - a e_\omega + f(x,t) - \hat{\beta}_\omega \gamma_\omega \operatorname{sign}(s_2(e_\omega))\right),$$

$$u_2 = -g^{-1}(x,t) \hat{\beta}_\omega \gamma_\omega \operatorname{sign}(s_2(e_\omega)), \operatorname{sign}(s_2(e_\omega)) = \begin{cases} 1, s_2(e_\omega) > 0, \\ -1, s_2(e_\omega) < 0. \end{cases}$$

При отсутствии математического описания неопределённостей $(a_\omega + \Delta a)$, $(b_\omega + \Delta b)\cos(\theta)$ в функциях $f(x,t), g(x,t)$, входящих в уравнения электромеханического равновесия системы (2), управляющая функция u не

обеспечивает цели управления. Доступной информацией описания системы могут служить измерения величин входов-выходов при возмущениях ξ_ω и последующее отображение их в пространстве входов-выходов $X \rightarrow Y$. Представлен метод и алгоритм адаптивного нечёткого скользящего режима управления асинхронным электроприводом, согласно которому правила нечётких моделей рассматриваются в точках максимума абсолютной ошибки модели по отношению к идеальным траекториям системы при условии физической возможности измерения входов или наличия свойства наблюдаемости входов-выходов (рисунок 6). В качестве кандидатов на роль входов нечёткой системы рассматриваются e_ω , $\cos\theta$, de_ω при изменении динамического момента нагрузки и приведённого момента инерции (позиция (поз.) 1 рисунок 6). В точках R_1, \dots, R_l максимального отклонения системы задаются правила FL-отношения базовой модели, описывающие закономерности, которые отражают нечёткое причинное отношение предпосылки – Если и заключения – Тогда в соответствии с алгоритмами Sugeno и Takagi

$$R_l : \text{Если } e_\omega \text{ есть } A_{1l}^1, \cos\theta \text{ есть } A_{2l}^2, de_\omega \text{ есть } A_{3l}^3, \text{Тогда} : f^1 = A_{fl},$$

$$R_l : \text{Если } e_\omega \text{ есть } A_{1l}^1, \cos\theta \text{ есть } A_{2l}^2, de_\omega \text{ есть } A_{3l}^3, \text{Тогда} : g^1 = A_{gl},$$

где A_{li}^i – нечёткие переменные определяемые соответствующими функциями принадлежности $\mu(x_i) = \exp[-(x - c_i)^2 / 2\sigma_i^2]$, которые представляет субъективную меру соответствия входов нечёткому подмножеству (i, \dots, n – входная переменная, l, \dots, m – правило), f^l, g^l – выходная функция. Матрица знаний представлена в виде 9 правил для нечёткого отображения нелинейных функций электромеханической системы $f(x, t)$ и 9 правил для $g(x, t)$. Правила разбиты на три группы: $R_{li}(3J_H)$, $R_{2i}(2J_H)$, $R_{3i}(J_H)$, характеризующиеся величиной приведённого момента инерции. В каждой группе по три правила, соответствующие уровням динамического момента нагрузки: $T_L = T_{LH}$, $T_L = 0.5T_{LH}$, $T_L = 0.1T_{LH}$.

Для исключения колебаний в системе, вызванных разрывным управляющим воздействием $\hat{\beta}_\omega \gamma_\omega \text{sign}(s_2(e_\omega))$, и для решения задачи управления в пределах граничного слоя – $|s_2(e_\omega)| < \Phi$ введён PI регулятор ($u_p = k_p s + k_i \int s dt$) (поз. 2 рисунок 6, рисунок 7а). Задаются диапазоны количественного изменения входных параметров $i_s \in [i_{сн}, i_{св}]$, $e_\omega \in [e_{\omega н}, e_{\omega в}]$, $\cos\theta \in [(\cos\theta)_н, (\cos\theta)_в]$, $de_\omega \in [de_{\omega н}, de_{\omega в}]$ на универсальное множество $U \in [0, 1]$ (поз. 3 рисунок 6), при этом расчёт количественных значений входных параметров определяется выражением $u_i(x_i) = (x_i^* - x_{ин})(x_{ив} - x_{ин})$. Для получения нечётких отображений $\hat{f}(x|\theta_f) = \theta_f^T \zeta(x)$, $\hat{g}(x|\theta_g) = \theta_g^T \zeta(x)$ нелинейных функций $f(x, t), g(x, t)$ с входными переменными $e_\omega, \cos\theta, de_\omega$ используется способ представления функций в виде (поз 4. Рисунок 6)



Рисунок 6 – Алгоритм адаптивного нечёткого управления.

$\kappa = f(x, t) - \hat{f}(x | \underline{\theta}_f^*) + (g(x, t) - \hat{g}(x | \underline{\theta}_g^*)) u$ нечёткой системы ограничение регулятора будет определяться выражением $|\hat{\rho}(s(e_i) | \theta_p)| = \xi_{\max} + |\eta| + \kappa = \Phi$ (рисунок 7а).

Синтезирован управляющий закон регулирования скорости $u = \hat{g}^{-1}(x | \theta_g) [-k_2 e_\omega - a e_\omega + \hat{f}(x | \theta_f) - \hat{\rho}(s | \theta_p)]$ (поз. 8) методами функций Ляпунова, в котором нечёткие отображения $\hat{f}(x | \theta_f)$, $\hat{g}(x | \theta_g)$, $\hat{\rho}(s | \theta_p)$ (поз. 7) определены параметрическими векторами $\theta_f, \theta_g, \theta_p$, ограниченными в допустимых пределах

$$y(x, t) = \frac{\sum_{l=1}^m y^l \left(\prod_i^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^m \prod_i^n \mu_{F_i^l}(x_i)} = \theta_y^T \zeta(x) = \theta_y \zeta^T(x),$$

где $\theta_y = [y^1, \dots, y^m]^T$ – настраиваемый параметрический вектор, $\zeta = [\zeta^1(x), \dots, \zeta^m(x)]^T$ – вектор отображения. Нечёткий PI регулятор представлен в виде функции отображения:

$$\hat{\rho}(s(e_i) | \theta_p) = \theta_p \rho(s),$$

где $\theta_p = [\theta_{k_p} \theta_{k_i}]^T$ – настраиваемый параметрический вектор,

$\rho(s) = [s_2(e_\omega), \int s_2(e_\omega) dt]^T$ – вектор отображения регулятора СРС (рисунок 7а). Для получения оптимального решения $\rho(s_2(e_\omega, t))$ используются невозмущённые параметры

электромеханической системы в точках экстремума, сформированные в виде 9 экспертных правил. Компоненты $\theta_p = [\theta_{k_p} \theta_{k_i}]^T$, $s_2(e_\omega)$, $\int s_2(e_\omega)$ вектора отображения нечёткого регулятора должны обеспечить оптимальное управляющее воздействие. Стабилизирующая добавка $\hat{\beta}_\omega \gamma_\omega \text{sign}(s_2(e_\omega))$ сохраняет своё управляющее действие за пределами граничного слоя $|s_2(e_\omega)| \geq \Phi$. С учётом ошибки аппроксимации

необходимо обеспечить оптимальное управляющее воздействие. Стабилизирующая добавка $\hat{\beta}_\omega \gamma_\omega \text{sign}(s_2(e_\omega))$ сохраняет своё управляющее действие за пределами граничного слоя $|s_2(e_\omega)| \geq \Phi$. С учётом ошибки аппроксимации

M_f, M_g, M_p (поз. 6 рисунок 6). Параметрические вектора настраиваются в соответствии с разработанными адаптивными законами: $p\theta_f = \gamma_1 s \zeta(x)$, $p\theta_g = \gamma_2 s \zeta(x)u$, $p\theta_p = \gamma_3 s p(s)$ (поз. 5 рисунок 6).

Расчёт динамических характеристик асинхронного электропривода со структурой адаптивного нечёткого управления скорости (рисунок 7а) выполнен в программе MATLAB SIMULINK. Система нечёткого управления обеспечивает сходимость аппроксимированных функций $\hat{f}(x|\theta_f), \hat{g}(x|\theta_g)$ к нелинейным функциям $f(x,t), g(x,t)$ (рисунок 7б, 7в). Нечёткий алгоритм управления, за счёт адаптивно настраиваемых коэффициентов нечёткого регулятора (рисунок 7г, 7д), обеспечивает снижение времени переходных процессов в 4 раза при номинальной скорости вращения электродвигателя (рисунок 8а, 8б) и в 2.5 раза на нижней границе диапазона регулирования $\omega_z = 0.01\omega_{ном}$ (рисунок 8г, 8д) по сравнению с векторным законом регулирования при изменении динамического момента нагрузки и переменном моменте инерции. Нечёткий режим управления позволяет снизить абсолютную динамическую ошибку скорости в 2 раза в сравнении с векторным законом регулирования при динамическом моменте нагрузки и изменении момента инерции механизма в диапазоне $J = J_{ном} \dots 3J_{ном}$ (рисунок 8г, 8д).

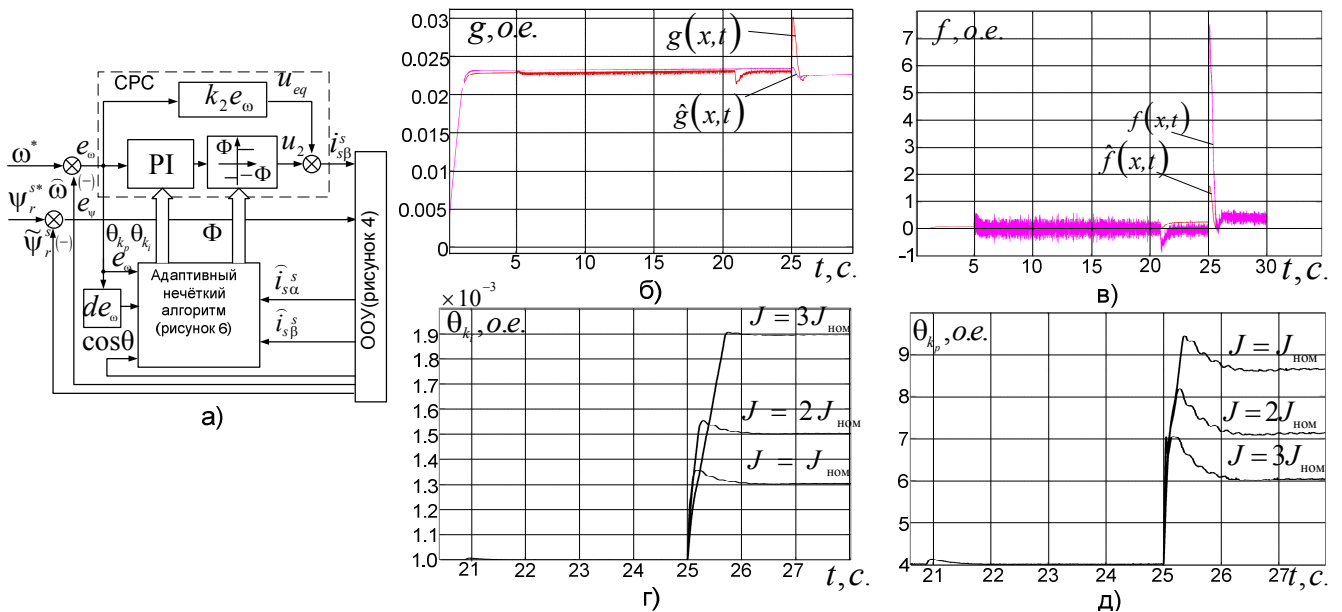


Рисунок 7 – а – Функциональная схема нечёткого управления; Графики аппроксимации функций при $T_L = T_{ном}$ и мгновенном изменении момента инерции $J = 3J_{ном}$: б – $f(x,t)$, в – $g(x,t)$, г – интегральный коэффициент θ_{k_i} , д – пропорциональный коэффициент θ_{k_p}

В пятой главе диссертации представлены описание экспериментальной установки, результаты исследований системы управления и адаптивного скользящего наблюдателя. Система управления реализована в блоке центрального процессора, входящего в состав терминала управления высоковольтного преобразователя частоты серии ЭСН (рисунке 9а). Преобразователь частоты выполнен по топологии многоуровневого инвертора напряжения. Терминал управления спроектирован в виде мультипроцессорной системы управления

высоковольтного преобразователя частоты с интеллектуальными микропроцессорными блоками.

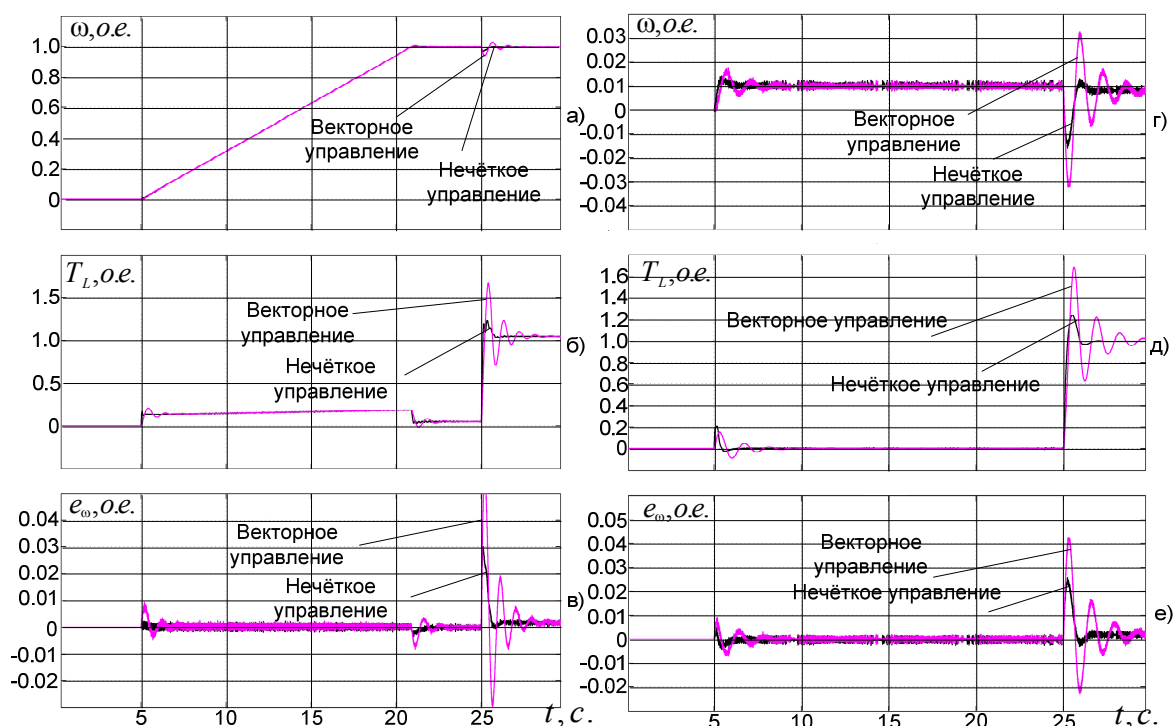


Рисунок 8 – Графики переходных процессов скорости при классическом векторном и адаптивном нечётком режиме управления при $T_L = T_{ном}$, $J = 3J_{ном}$, при $\omega_z = \omega_{ном}$ – а – электрической угловой скорости, б – электромагнитного момента, в – ошибки регулирования скорости; при $\omega_z = 0.01\omega_{ном}$ – г – электрической угловой скорости, д – электромагнитного момента, е – ошибки регулирования скорости

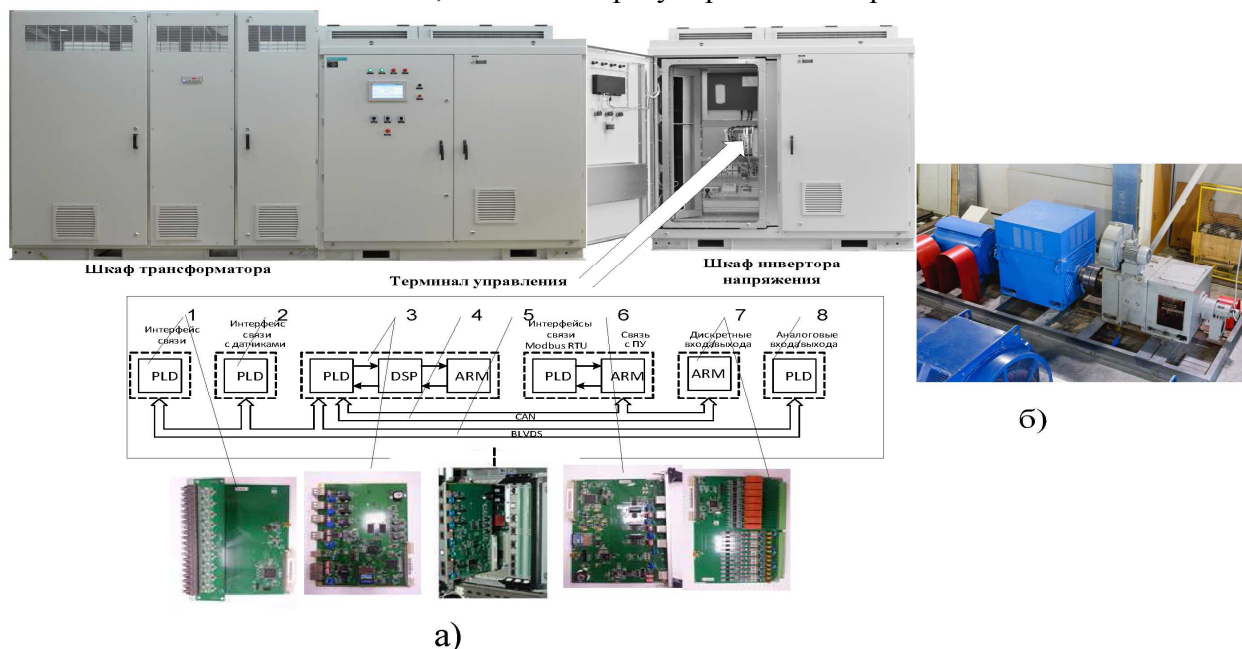


Рисунок 9 – Экспериментальная установка, а – система управления преобразователя частоты серии ЭСН, б – нагрузочный экспериментальный стенд.

Блок центрального процессора обеспечивает параллельную работу микропроцессорных модулей и выполняет функции: реализация законов регулирования в асинхронном электроприводе; оценка потокоцепления ротора и

угловой электрической скорости вращения ротора, параметров асинхронного электродвигателя; реализация аварийного регистратора и защит асинхронного электродвигателя.

Осциллограммы переходных процессов (рисунок 10) при работе преобразователя частоты на асинхронный электродвигатель 630 кВт, 6 кВ в составе электромашиного агрегата (рисунок 9б) свидетельствуют, что скользящий наблюдатель оценки потокосцепления ротора и скорости вращения ротора в структурах систем управления асинхронным электродвигателем обеспечивает устойчивую работу электропривода в диапазоне регулирования скорости $0.01\omega_n$ (рисунок 10а, 10в) и ω_n (рисунок 10б, 10г); инвариантность к параметрическому возмущению, заданному в виде дрейфа активного сопротивления статора и постоянной времени ротора, вариациями приведённого момента инерции. Скользящий наблюдатель в составе системы управления многоуровневого инвертора напряжения серии ЭСН не вносит высокочастотных пульсаций в выходное напряжение и фазные токи (рисунок 10в, 10г).

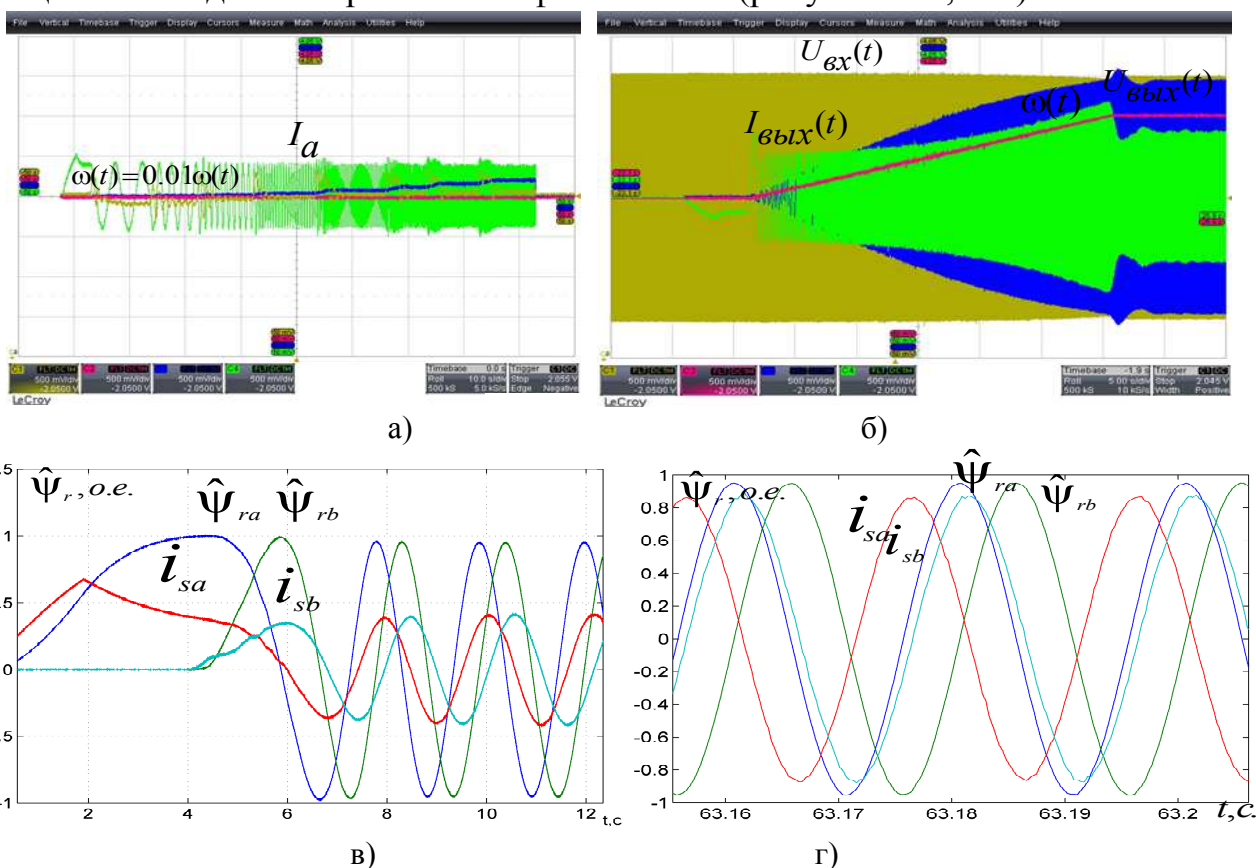


Рисунок 10 – Осциллограммы и показания регистратора скорости, фазных токов и оценки потокосцепления ротора при номинальной статической нагрузке и регулировании скорости: а, в – при $\omega_z = 0.01\omega_{ном}$, б, г – при $\omega_z = \omega_{ном}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан адаптивный наблюдатель потокосцепления и угловой электрической скорости ротора асинхронного электродвигателя на основе преднамеренной организации в системе скользящего режима. Для обеспечения нечувствительности к дрейфу параметров асинхронного электродвигателя при оценке потокосцепления и угловой электрической скорости ротора асинхронного

электропривода наблюдатель разработан в виде двух скользящих настраиваемых моделей.

2. Доказана эффективность применения разработанного наблюдателя оценки переменных состояния с учётом построения системы косвенного векторного управления асинхронным электроприводом, адаптивного скользящего режима управления асинхронным электроприводом, адаптивного нечёткого режима управления при параметрическом дрейфе асинхронного электродвигателя, переменном динамическом моменте нагрузки и вариациях приведённого момента инерции механизма.

3. Разработан наблюдатель оценки постоянной времени ротора и активного сопротивления статора. Использование наблюдателя оценки постоянной времени ротора позволяет обеспечить параметрическую адаптацию к изменению постоянной времени ротора в структуре косвенного векторного управления.

4. Разработан адаптивный скользящий режим управления асинхронным электроприводом с применением алгоритмов сигнально-параметрической адаптации. Сигнальная адаптация обеспечивается быстрым релейным регулятором с адаптивным настраиваемым коэффициентом усиления. Параметры разрывной функции управления асинхронного электродвигателя настраиваются в соответствие с разработанным законом адаптации.

5. Синтезирована математическая модель асинхронного электропривода, которая представлена системой дифференциальных уравнений ошибок слежения управляемых переменных. Модель учитывает неопределённости асинхронного электропривода, динамическое отклонение вектора потока ротора асинхронного электродвигателя в виде угла ошибки отклонения от осей ориентированной системы координат. Угол ошибки обусловлен неточностью в определении пространственного вектора потокосцепления ротора, как результат внешнего возмущения на объект управления.

6. Проведён синтез системы управления асинхронного электропривода на основе скользящего режима с настраиваемыми параметрами при возмущениях в виде переменного нагрузочного момента и вариациях приведённого момента инерции в пределах допустимых значений.

Доказана эффективность разработанного адаптивного скользящего режима управления асинхронным электроприводом в сравнении с векторным законом за счёт поддержания высокой относительной статической точности поддержания скорости – не менее 1 %, увеличения быстродействия в 2,3 раза, возможности сохранения стабильных динамических свойств асинхронного электропривода в диапазоне регулирования скорости 1/100.

7. Разработана методика и алгоритм настройки параметров нечёткого регулятора адаптивной нечёткой системы управления скоростью асинхронного электропривода, который представлен в виде аппроксимированной нечёткой модели в условиях неизмеримости момента нагрузки и переменного момента инерции механизма. Методика настройки параметров нечёткого регулятора позволяет решить задачу эффективного управления асинхронным электроприводом за счёт: снижения абсолютной динамической ошибки при

регулировании скорости в 2 раза в сравнении с векторным законом регулирования; обеспечения относительной статической ошибки регулирования скорости не менее 0.1% при изменении динамического момента нагрузки от нуля до номинального значения и приведенного момента инерции механизма в диапазоне от $J = J_{ном}$ до $J = 3J_{ном}$.

8. Работоспособность разработанных наблюдателей оценивания переменных состояния, алгоритмов управления в асинхронном электроприводе доказана путём математического моделирования в среде Matlab. Подтверждено практическое применение способов построения адаптивных режимов управления в разработанных и серийно выпускаемых преобразователях частоты среднего напряжения серии ЭСН производства ООО НПП "ЭКРА" на базе многоуровневого инвертора напряжения.

Значение результатов исследований состоит в дальнейшем расширении границ применения теории скользящих режимов управления, использования теории нечёткой логики для решения задач управления асинхронным электроприводом в условиях нестационарности параметров асинхронного электродвигателя и неизмеримости внешних возмущений в виде переменного нагрузочного момента и вариаций приведённого момента инерции механизма.

Список научных трудов по теме диссертации:

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Вишневский, В. И. Адаптивный нечёткий алгоритм управления асинхронного электродвигателя / В. И. Вишневский // Экспозиция НЕФТЬ ГАЗ. – 2012. – №4. – С. 77–83. (0,375 п. л. / 0,375 п. л.)

2. Вишневский, В. И. Адаптивный скользящий наблюдатель скорости для бездатчикового асинхронного электропривода / В. И. Вишневский, С. А. Лазарев // Вестник Чувашского университета. – 2010. – №3. – С. 213–222. (0,563 п.л. / 0,4 п.л.)

3. Вишневский, В. И. Адаптивный скользящий режим управления скоростью асинхронного электродвигателя / В. И. Вишневский, С. А. Лазарев // Вестник Чувашского университета. – 2011. – №3. – С. 52–59. (0,437 п. л. / 0,32 п. л.)

4. Вишневский, В. И. Асинхронный электропривод с прямым управлением моментом на основе наблюдателя полного порядка, построенного на нечёткой логике / В. И. Вишневский, С. А. Лазарев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – №6. – С. 9–15. (0,375 п. л. / 0,27 п. л.)

5. Вишневский, В. И. Высоковольтный частотно-регулируемый электропривод для магистральных насосных агрегатов ОАО «АК «Транснефть» / В. И. Вишневский, Б. Г. Гриша, Т. С. Мустафин, С. В. Павленко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – №3. – С. 72–80. (0,5 п. л. / 0,3 п. л.)

Объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент РФ на полезную модель RU 145655 U1. Высоковольтный частотно регулируемый электропривод / В. И. Вишневский, П. Ю. Бахарев, С. В. Павленко, Г. В. Федяров. – Заявка 2014110188/07 от 18.03.2014 г. Дата публикации 27.09.2014.

Статьи в других научных изданиях:

7. Вишневский, В. И. Адаптивный скользящий наблюдатель в асинхронном электроприводе / В. И. Вишневский, С. А. Лазарев, П. В. Митюков // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. IV. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 165–179. (0,875 п. л. / 0,5 п. л.)

8. Вишневский, В. И. Адаптивный скользящий режим управления скоростью асинхронного электропривода / В. И. Вишневский, С. А. Лазарев // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – №3. – С. 26–30. (0,25 п. л. / 0,2 п. л.)

9. Вишневский, В. И. Адаптивный скользящий нечёткий режим управления скоростью асинхронного электродвигателя / В. И. Вишневский // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: Сборник научных статей. Выпуск I. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2012. – С. 88–108. (1,25 п. л. / 1,25 п. л.)

10. Вишневский, В. И. Высоковольтные электроприводы ООО НПП "ЭКРА" для комплексной автоматизации технологического процесса, экономии ресурсов и энергосбережения / В. И. Вишневский, М. И. Альтшуллер, С. А. Лазарев, С. В. Павленко // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2014: в 2 т. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 355–362. (0,437 п. л. / 0,25 п. л.)

11. Вишневский, В. И. Нечёткое управление моментом асинхронного электропривода / В. И. Вишневский, М. И. Альтшуллер, С. А. Лазарев // Сборник материалов V международной (XVI Всероссийской) научной конференции 18-21 сентября 2007 г. Санкт-Петербург. – 2007. – С. 125–130. (0,3125 п. л. / 0,25 п. л.)

12. Вишневский, В. И. Применение теории нечёткой логики для синтеза наблюдателей полного порядка в системах с прямым управлением моментом асинхронного электропривода / В. И. Вишневский, С. А. Лазарев // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 2007. – № 2. – С.29–37. (0,5 п. л. / 0,4 п. л.)

Вишневский Владимир Ильич

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО НЕЧЁТКОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03. 08. 2016 г. Формат 60×80/16. Печ. л. 1,5
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 120 экз. Заказ № 632

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Принт-Люкс»
г. Чебоксары, пр. М. Горького, 26
тел. (8352) 431-911