



Минобрнауки России  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
111250, Россия, Москва,  
Красноказарменная ул., 14,  
Тел.: (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38  
E-mail: universe@mpei.ac.ru  
<http://www.mpei.ru>

✓ Верждаю

Рецензия на диссертацию «НИУ «МЭИ»

\_\_\_\_\_ Н.Д. Роголев

Дата « 15 » сентября 2016 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации о диссертационной работе  
Вишневого Владимира Ильича  
на тему «Разработка адаптивного нечёткого скользящего управления  
асинхронным электроприводом»,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.09.03 – Электромеханические комплексы и системы

### **Актуальность темы диссертационной работы.**

Развитие новых технологий в различных отраслях промышленности определяет необходимость создания высокодинамичных и высокоэффективных асинхронных электроприводов. Процесс создания новых и совершенствования существующих электроприводов переменного тока связан с разработкой надежных и экономичных силовых полупроводниковых преобразователей, разработкой математического аппарата и методов анализа статических и динамических режимов работы электропривода, выявлением законов управления асинхронным электроприводом. Но создание эффективного асинхронного электропривода сдерживается сложностью построения системы управления, что обусловлено недостаточной теоретической разработкой адаптивных наблюдателей переменных состояния асинхронного электропривода, инвариантных к

изменениям параметров асинхронного электродвигателя. Системы управления общепромышленным асинхронным электроприводом строятся на базе классических законов векторного управления, изобретенного в 70-х годах XX-го века. Синтез систем векторного управления осуществляется с применением классической теории автоматического управления, использующей традиционные пропорционально-интегральные регуляторы, при этом расчёт параметров регуляторов ведётся из условий наилучшего набора параметров объекта. **Недостаточная проработка теоретических вопросов** адаптивной настройки пропорционально-интегральных регуляторов приводит в большинстве случаев к неоптимальной работе асинхронных электроприводов. 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. **Выбранное диссертантом направление исследования** представляет интерес не только для специалистов в области разработки систем управления асинхронными электроприводами, но и для исследователей в области разработки автоматизированных систем управления различными объектами,

характеризующимися нестационарностью, нелинейностью параметров, многосвязностью координат регулирования.

**Возрастание роли применения асинхронных электроприводов** в автоматизированных системах управления технологическими процессами, характеризующимися необходимостью быстрой отработки управляющего сигнала в совокупности с точностью поддержания технологического параметра, требует создания новых эффективных алгоритмов и быстродействующих систем управления.

**Вопросы влияния** переменного момента инерции механизма и динамического момента нагрузки; переменных во времени сопротивлений ротора и статора; нелинейности индуктивностей статора и ротора от тока намагничивания по причине насыщения магнитной системы на качество регулировочных характеристик **остаются актуальными для исследования**, поскольку каждый из факторов заслуживает отдельного наблюдения и исследования.

Это дает основание утверждать, что **научная проблема**, сформулированная в диссертации, **является актуальной**. Решение указанной проблемы позволит **обеспечить решение задачи 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.

Выводы и рекомендации по этому вопросу являются необходимыми для построения адаптивного наблюдателя электрической угловой скорости ротора и потокосцепления ротора, адаптивной настройки нечёткого пропорционально-интегрального регулятора к вариациям приведённого момента инерции в системах управления бездатчикового асинхронного электропривода. Тема исследований по своему содержанию отвечает потребностям асинхронных электроприводов, функционирующих в составе

технологических линий, характеризующихся переменным моментом инерции и переменным динамическим моментом нагрузки. К технологическим линиям такого рода можно отнести шаровые мельницы с различной степенью загрузки, магистральные насосные агрегаты со сменными насосными колесами, конвейерные механизмы.

Представленные в теоретической и практической части положения диссертации отражают **степень достоверности результатов проведенных исследований**. Полученные автором практические результаты соответствуют проведенным теоретическим исследованиям и результатам математического моделирования. Принятые в работе допущения и ограничения при разработке математической модели объекта регулирования обоснованы и отражены в полном объеме. Проведенные научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач управления в асинхронном электроприводе. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуты следующие положения.

1. Разработан 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 (стр. 46–63).

Адаптивный скользящий наблюдатель вектора потокосцепления и электрической угловой скорости ротора асинхронного электродвигателя, отличается 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. При этом одна из моделей является базовой и не содержит параметрические неопределённости, вторая модель

учитывает неопределённости и адаптивно настраивается. В качестве адаптивной настройки используется пропорционально-интегральный регулятор, который имеет простую реализацию при практическом построении бездатчикового асинхронного электропривода.

Доказывается эффективность использования наблюдателя электрической угловой скорости ротора и вектора потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя в различных структурах управления асинхронным электроприводом: векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора, скользящего режима управления асинхронным электроприводом, адаптивного нечёткого режима управления (стр. 63–77, стр. 103–109, стр. 131–139).

2. Разработана 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 (стр. 87–100).

Реализацию высококачественных законов управления асинхронными электроприводами, функционирующих в условиях параметрических возмущений, переменного момента инерции механизма и динамического момента нагрузки, невозможно обеспечить без информационной поддержки о параметрах возмущения или модели возмущений. В диссертационной работе вводится параметр – угол динамической ошибки между оцененным вектором потока ротора и желаемым вектором потока ротора, относительно которого ориентирована ось вращающейся системы координат. Угол динамической ошибки используется в качестве косвенного параметра, учитывающего возмущения в асинхронном электроприводе. Доказано, что угол динамической ошибки является следствием параметрических и внешних возмущений, которые приводят к динамическим ошибкам регулирования скорости, динамическому броску и колебаниям в электромагнитном моменте.

Для синтеза математической модели асинхронного электропривода использована временная и структурная декомпозиции обобщённой модели, которые позволяют представить исходную систему в виде эквивалентных подсистем и обеспечить независимое рассмотрение потокосцепления ротора и электромагнитного момента асинхронного двигателя.

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. Использование математической модели позволяет реализовать адаптивный скользящий режим управления асинхронным электродвигателем с адаптивно настраиваемыми параметрами к внешним возмущениям.

Разработан адаптивный закон настройки параметров разрывных функций 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. Сигнальная адаптация строится с применением быстродействующего релейного регулятора. Адаптивно настраиваемые параметры релейного регулятора в контуре регулирования скорости настраиваются согласно с синтезированным адаптивным законом: производная от настраиваемого параметра эквивалентна отклонению траектории реальной скорости от выбранной желаемой траектории, с заданной сходимостью замкнутого контура регулирования скорости. Параметры релейного регулятора контура потокосцепления настраиваются в функции оценки возмущения, которая косвенно оценивается в виде угла динамической ошибки.

Эффективность адаптивного скользящего режима управления доказана в сравнении с векторным законом регулирования за счёт увеличения быстродействия системы в 4 раза на отработку возмущения в виде вариаций

приведённого момента инерции и момента нагрузки, обеспечения относительной статической точности поддержания электрической угловой скорости ротора 1% (стр. 103–109).

3. Разработан метод и алгоритм адаптивного нечёткого режима управления скоростью асинхронного электропривода, позволяющий получить эффективный закон управления скоростью при неизмеримости динамического момента нагрузки и переменном моменте инерции механизма (стр. 111–121).

Методика адаптивного нечёткого режима управления скоростью асинхронного электропривода строится на основе предварительной аппроксимации нелинейных функций уравнения электромеханического равновесия и адаптивной настройкой параметров пропорционально-интегрального регулятора к внешним возмущениям. Аппроксимация нелинейных функций строится на базе разработанной базы знаний с использованием алгоритмов Sugeno и Takagi в точках максимального отклонения параметров системы на входные воздействия: ошибки измеренной скорости от заданной, производной ошибки по скорости, динамического угла ошибки при изменении динамического момента нагрузки и приведённого момента инерции механизма. Нечёткая модель в точках максимального отклонения системы отражает нечёткое причинное отношение входов к выходам – предельное отклонение значений нелинейных функций, входящих в уравнение электромеханического равновесия. Снижение вибрации в электродинамическом моменте при адаптивном скользящем режиме в пределах граничного слоя, вызванное работой разрывной функции, обеспечивается введением пропорционально-интегрального регулятора с адаптивными настраиваемыми параметрами интегральной и пропорциональной части.

В работе использован способ представления нечётких отображений нелинейных функций и пропорционально-интегрального регулятора в виде произведения настраиваемого параметрического вектора и вектора

отображения. Параметрические вектора при внешних возмущениях настраиваются в соответствии с разработанным законом адаптации: производная от параметрического вектора эквивалентна произведению отклонения от скользящей поверхности и вектора отображения.

4. Разработан 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 (стр. 122–131).

В соответствии с разработанным методом адаптивного нечёткого скользящего режима управления представлен пошаговый алгоритм реализации этапов (стр. 129–131):

- оценка обратных связей управляемых координат;
- вычисление входов-выходов и приведение их к нормализованному виду;
- определение количественного диапазона динамической нагрузки, эквивалентной току статора, и приведение к нормализованному виду;
- расчёт векторов отображений с учётом весовых коэффициентов гауссовых функций принадлежности базы знаний;
- расчёт производных параметрических векторов и определение параметрических векторов нелинейных функций и адаптивно настраиваемых пропорционально-интегрального регулятора;
- расчёт результирующих значений векторов отображений;
- расчёт результирующего управляющего воздействия.

Эффективность нечёткого алгоритма управления доказана за счёт снижения абсолютной динамической ошибки скорости в 2 раза в сравнении с векторным законом регулирования при вариациях приведённого момента инерции. Адаптивно настраиваемые коэффициенты нечёткого регулятора обеспечивают снижение времени переходных процессов в 4 раза при номинальной скорости вращения электродвигателя и в 2,5 раза на нижней



границе диапазона регулирования скорости по сравнению с векторным законом регулирования при изменении динамического момента нагрузки и переменном моменте инерции механизма (стр. 131–138).

Обоснованность научных положений, рекомендаций и достоверность результатов исследований подтверждаются:

– корректностью применения 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;

– согласованностью результатов теоретических расчетов с данными, полученными путём математического моделирования 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.

**Научная значимость** результатов исследований заключается в том, что теоретические выводы определяют дальнейшее развитие теории систем с переменной структурой с применением теории нечёткой логики к решению задач управления асинхронным электроприводом.

1. Метод и алгоритм настройки параметров нечеткого регулятора скорости адаптивной системы управления асинхронным электроприводом, представленный в виде аппроксимированной нечеткой модели, позволяет обеспечить адаптацию к возмущениям со стороны нагрузки, которые не могут быть измерены.

2. Способ построения скользящего наблюдателя скорости и потокосцепления ротора с применением настраиваемых скользящих моделей тока, замкнутых интегральными оценками потокосцепления ротора, является дальнейшим развитием теории адаптивных наблюдателей асинхронного электропривода. Одна из моделей является базовой и не

содержит параметрические неопределённости, вторая модель учитывает неопределённости асинхронного электродвигателя.

3. Способ построения математической модели асинхронного электропривода с нестационарными параметрами в виде дифференциальных уравнений слежения ошибок скорости и потокосцепления ротора, которая учитывает динамическое отклонение вектора потока ротора асинхронного электродвигателя. Математическая модель асинхронного электропривода позволяет представить исходную систему в виде эквивалентных подсистем и обеспечить независимое рассмотрение потокосцепления ротора и электромагнитного момента асинхронного двигателя.

**Практическое значение** работы определяется тем, что решенные задачи нашли применение в следующих практических приложениях:

1. Наблюдатель электрической угловой скорости ротора и вектора потокосцепления ротора асинхронного электропривода использован для построения цифровой системы управления в высоковольтном преобразователе частоты серии ЭСН. Применение наблюдателя в структуре векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора позволяет обеспечить улучшение 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 электроприводом

различных производственных механизмов, которые характеризуются переменным моментом инерции и динамическим моментом нагрузки.

**Считаем целесообразным продолжить работу по следующим направлениям:**

1. Процесс определения экспертных весовых коэффициентов и настройка параметров функций принадлежности Гауса является трудоёмким. Автору диссертационной работы следовало провести сравнительный анализ различных типов архитектур интеллектуальных систем с целью выбора оптимального типа для решения задач диссертационной работы.

2. Для достижения цели управления автором сделано допущение, что математическая модель силового преобразователя представляется непрерывной аппроксимацией дискретной коммутационной функцией, которая позволяет выделить непрерывные процессы, отражающие основную энергетическую нагрузку. В части продолжения исследований, следует рассмотреть работу системы адаптивного скользящего режима управления в составе преобразователей частоты, использующих различную топологию построения инверторов напряжения: многоуровневый инвертор напряжения в выделенной средней точке (технология ANPC), модульные многоуровневые инвертора напряжения (технология MMC) с активным выпрямителем с возможностью рекуперации энергии при знакопеременном моменте нагрузки.

**Замечания по диссертационной работе:** как недостаток отмечаем, что в работе не нашло свое отражение оценка влияния погрешности измерения токов и напряжений статора на оценку вектора потокосцепления и электрической скорости вращения ротора.

При рассмотрении источников возмущения на работу асинхронного электропривода с разработанными системами управления автору следует обратить внимание на влияние качества электроэнергии: снижение напряжения, несимметрии входного напряжения, динамические провалы во входном напряжении.

Недостаточно проработан вопрос применимости косвенного параметра в виде угла динамической ошибки в качестве идентификатора внешних возмущений для адаптивных структур управления асинхронным электродвигателем, не использующих идею векторного управления.

Замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейших публикациях по теме исследования.

### **Заключение**

Работа является законченной и выполнена автором самостоятельно на достаточном научном уровне. Работа написана литературным языком, стиль изложения доказательный. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчёты. По каждой главе в работе в целом имеются выводы. Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Оценивая диссертационную работу в целом можно заключить, что она представляет собой законченное исследование, содержащее новые научные и практические результаты, внедренные в производство. Задачи, решенные диссертантом в работе, имеют существенное значение для построения систем управления высокопроизводительных, высокодинамичных асинхронных электроприводов, применяемых в различных технологических линиях в нефтегазовой, горнообработывающей, машиностроительной отраслях промышленности РФ. Диссертация «Разработка адаптивного нечеткого скользящего управления асинхронным электроприводом» соответствует специальности 05.09.03-Электротехнические комплексы и системы и требованиям ВАК Министерства образования и науки, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Вишнеvский Владимир Ильич заслуживает присуждения ученой степени кандидат технических наук.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждены на заседании кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ» 30 августа 2016 г. протокол № 1.

Заведующий кафедрой

Автоматизированного электропривода

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. А.С. Анучин

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Е-250

+7-905-538-1910, anuchin.alecksey@gmail.com.

Анучин Алексей Сергеевич

Профессор кафедры Автоматизированного электропривода

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Е-250

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» \_\_\_\_\_ д.т.н. О.И. Осипов

Осипов Олег Иванович

Подписи Анучина А.С. и Осипова О.И. удостоверяю

Зам. начальника УРПС \_\_\_\_\_ Е.Ю. Баранова