

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
**на диссертационную работу**  
**Вишневого Владимира Ильича**  
**«Разработка адаптивного нечёткого скользящего управления асинхронным электроприводом», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**  
**по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**

Представленная на отзыв диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 119 наименований и приложений, включает 186 страниц машинного текста, 61 рисунок, 12 таблиц и приложений. Автореферат представлен на 24 страницах и содержит 10 рисунков.

**Актуальность темы диссертации**

Области применения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором постоянно расширяются в связи с развитием новых технологий в различных отраслях промышленности, где требуется эффективный электропривод переменного тока. В то же время применение асинхронного электропривода наталкивается на сложность построения системы управления и обусловлен этот факт следующими причинами:

асинхронный электропривод является сложной многосвязной, нелинейной, динамической системой;

асинхронный электродвигатель характеризуется не постоянными и меняющимися во времени сопротивлениями ротора и статора; индуктивности статора и ротора, взаимные индуктивности имеют нелинейную зависимость от тока намагничивания, обусловленную насыщением магнитной системы;

асинхронный электропривод часто функционирует в условиях переменного момента инерции механизма и динамического момента нагрузки;

некоторые параметры переменных состояния: токи и потокосцепления ротора, скорость вращения ротора напрямую не могут быть измерены.

При использовании классических законов векторного управления в асинхронных электроприводах имеет место запаздывание в формировании электромагнитного момента; за счёт сложности компенсации взаимного влияния контуров регулирования снижается

качество регулирования. Существующие системы векторного управления синтезируются с применением классических разделов теории автоматического управления, при этом расчёт параметров регуляторов ведётся из условий наилучшего набора параметров объекта. Источниками ошибок при формировании управляющих векторов токов и напряжений являются погрешности в определении опорного вектора потокосцепления в статорной системе координат. Для устранения этой погрешности широко используются адаптивные наблюдатели с настраиваемой моделью асинхронного двигателя, наблюдатели полного порядка. Все перечисленные методы связаны со сложными вычислениями и потерей работоспособности в случае значительного дрейфа параметров объекта управления.

Развитие технологий требует повышения требований к качеству работы асинхронных электроприводов переменного тока в современных системах автоматического управления. Совершенствование асинхронных электроприводов переменного тока предполагает разработку надежных и экономичных силовых преобразователей напряжения и тока, разработку математического аппарата теории автоматического управления и методов анализа статических и динамических режимов работы электропривода, выявление законов управления асинхронным электроприводом.

Выбранное в диссертации Вишневого В.И. направление разработки метода и алгоритма адаптивной бездатчиковой системы управления асинхронным электроприводом в условиях параметрической неопределённости и внешних возмущений в виде переменного момента нагрузки и нестационарного момента инерции механизма весьма актуально.

**Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе**

#### **Новизна работы**

Современные тенденции построения систем управления асинхронными электроприводами, функционирующими в условиях неопределённостей, базируются на теории адаптивного управления и теории сложных систем, с использованием методов скоростного градиента, теории систем с переменной структурой, теории робастной устойчивости и управления, теории нечёткой логики и нейросетевой технологии. Выбранная тема диссертации отражает современные направления исследований, при решении поставленных в диссертации задач применен оригинальный подход к решению поставленных задач, который заключается в следующем.

1. Для разработки высококачественной системы управления асинхронным электроприводом без применения механических измерителей скорости вращения ротора разработан наблюдатель вектора потокосцепления и электрической угловой скорости

ротора асинхронного электродвигателя. Наблюдатель получен путём сравнения двух настраиваемых скользящих моделей тока асинхронного электродвигателя, замкнутых обратными связями интегральных оценок потокосцепления ротора. 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 на практике просто реализуется при построении бездатчикового асинхронного электропривода. Доказана эффективность использования наблюдателя вектора потокосцепления и электрической угловой скорости ротора асинхронного электродвигателя в различных структурах управления асинхронным электроприводом: векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора, скользящего режима управления, адаптивного нечёткого режима управления.

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 неявном виде.

: Для реализации высококачественных законов векторного управления асинхронным электроприводом, функционирующим в условиях параметрических возмущений, переменного момента инерции механизма и динамического момента нагрузки, требуется информация о возмущениях, о параметрах объекта, или модели возмущений. Не все параметры переменных состояния асинхронного электропривода могут быть измерены, и не всегда удаётся получить их оценку с необходимой степенью точности для построения адаптивных законов настройки параметров регуляторов. В диссертационной работе представлен подход оценки косвенного параметра, учитывающего возмущения в асинхронном электроприводе. В качестве косвенного параметра принят динамический угол ошибки между оцененным и желаемым вектором потока ротора, относительно которого ориентирована ось вращающейся системы координат.

В системах векторного управления угол динамической ошибки является следствием параметрических и внешних возмущений, которые приводят к динамическим ошибкам регулирования скорости, динамическому броску и колебаниям электромагнитного момента.

Использование указанной математической модели позволяет отдельно рассматривать контур регулирования потокосцепления ротора и угловой скорости вращения ротора, и реализовать адаптивный скользящий режим управления.

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.

Сигнальная адаптация строится с применением быстродействующего релейного регулятора. Параметры разрывных функций управления контура потокосцепления вычисляются из достаточных условий существования скользящих режимов и настраиваются в функции оценки возмущения в виде тригонометрической функции угла динамической ошибки, который ограничен предельным возможным значением. Параметр разрывной функции в контуре скорости настраивается в соответствие с адаптивным законом: скорость изменения возмущения эквивалентна отклонению траектории реальной скорости вращения ротора от желаемой траектории, заданной неявной эталонной моделью асинхронного электродвигателя.

Эффективность разработанного адаптивного скользящего режима управления доказана фактами: 1) увеличения быстродействия системы в 4 раза на отработку возмущения в виде вариаций приведённого момента инерции и момента нагрузки по сравнению с векторным законом регулирования, 2) обеспечения относительной статической погрешности стабилизации электрической угловой скорости ротора в пределах 1%.

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

При отсутствии математического описания неопределённостей, входящих в уравнения электромеханического равновесия асинхронного электропривода, сложно обеспечить цели управления. В диссертационной работе использовано свойство нечёткой логики: аппроксимировать нелинейную систему с определённой точностью, достаточной для построения управляющей функции. Для аппроксимации нелинейной системы построена нечёткая модель с использованием алгоритмов Sugeno и Takagi. В качестве входов нечёткой системы рассматриваются ошибка измеренной скорости от заданной, производная ошибки по скорости, тригонометрическая функция от динамического угла ошибки при изменении динамического момента нагрузки и приведённого момента инерции. Нечёткая модель разбита на диапазоны изменения динамического момента нагрузки и приведённого момента инерции. В точках максимального отклонения

рассматриваемых величин нечёткие правила модели описывают закономерности, которые отражают нечёткое причинное отношение входов к выходам. В качестве выходов приняты чёткие значения нелинейных функций, входящих в уравнение электромеханического равновесия. Для исключения колебаний в системе, вызванных разрывным управляющим воздействием и для решения задачи управления в пределах граничного слоя введён адаптивный пропорционально-интегральный регулятор с настраиваемыми параметрами. В точках максимального отклонения параметров системы входным параметрам поставлено в соответствие необходимое управляющее воздействие пропорционально-интегрального регулятора, позволяющее обеспечить желаемое качество процессов регулирования скорости. Для получения нечётких отображений нелинейных функций и пропорционально-интегрального регулятора используется способ представления в виде произведения настраиваемого параметрического вектора и вектора отображения. Параметрические вектора настраиваются в соответствии с разработанным адаптивным законом.

Эффективность нечёткого алгоритма управления доказана фактом снижения абсолютной динамической ошибки скорости в 2 раза по сравнению 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.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, характеризуются следующими оценками:**

сходимостью теоретических и экспериментальных исследований;

обоснованностью допущений при разработке математических моделей наблюдателей переменных состояния асинхронного электропривода, разработанных методов регулирования для систем асинхронного электропривода;

сопоставлением достигнутых результатов с результатами, полученными при использовании классических методов векторного регулирования с ориентацией по вектору потокосцепления ротора;

разработанных и внедрённых методов регулирования асинхронным электроприводом в цифровой системе управления высоковольтного преобразователя частоты серии ЭСН на напряжения 6-10кВ и мощность до 5000 кВт, производства ООО НПП «ЭКРА».

**Достоверность результатов,** полученных при разработке наблюдателей переменных состояния асинхронного электропривода, адаптивного скользящего режима управления асинхронным электроприводом, метода и алгоритма адаптивного нечёткого режима управления скоростью асинхронного электропривода, подтверждена путём математического моделирования с применением пакета прикладных программ SIMULINK в среде MATLAB, экспериментальными исследованиями цифровой системы управления высоковольтного преобразователя частоты при работе на асинхронный электродвигатель 630 кВт, 6 кВ в составе электромашинного агрегата.

#### **Практическая значимость результатов исследований**

1. Наблюдатель электрической угловой скорости 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 улучшить технические характеристики асинхронных электроприводов: увеличить диапазон регулирования скорости, повысить точность поддержания заданной скорости, обеспечить работоспособность при малых скоростях, инвариантность 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 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. К таким механизмам можно в полной мере отнести шаровые мельницы, конвейеры с переменной загрузкой, насосные агрегаты с использованием в своём составе разных по диаметру рабочих колёс.

**Теоретическая значимость результатов диссертации** заключается в дальнейшем развитии теории систем с переменной структурой на основе применения теории нечёткой логики к решению задач управления асинхронным электроприводом. Использование свойства нечёткой логики к аппроксимации нелинейных функций, параметры которых напрямую не могут быть измерены, позволяет обеспечить адаптивную настройку интегральных и пропорциональных параметров регулятора, который вводится в пределах граничного слоя для снижения пульсаций в регулируемых координатах.

### **Замечания к диссертации и автореферату**

В качестве рекомендаций и замечаний к диссертационной работе следует отметить следующее.

1. По результатам разработки адаптивного скользящего наблюдателя представляется целесообразным провести сравнительный анализ с разработанными и применяемыми адаптивными наблюдателями с настраиваемыми моделями, наблюдателями полного порядка в структурах векторного управления при параметрическом дрейфе асинхронного электродвигателя.

2. При практическом применении адаптивной бездатчиковой системы в управлении частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами магистральных насосных агрегатов на объектах компании «АК «Транснефть» следовало бы дать более чёткое обоснование необходимости данного решения.

3. В целом по диссертационной работе следовало бы дать оценку границ применимости полученных результатов и сформулировать рекомендации, где и в каких системах асинхронного электропривода, при каких соотношениях постоянных времени системы и размерах дрейфа рассмотренных в тексте параметров необходимо использовать результаты диссертации, и где это было бы, скажем, слишком дорого и излишне.

#### **Выводы по представленной диссертационной работе**

Диссертация представлена логичным, аргументированным и ясным языком, хорошо оформлена. Основные материалы и результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях (пять статей) и других сборниках - 6 статей, апробированы на научно-технических конференциях, в том числе и международных, и с этих позиций отвечает требованиям ВАК к кандидатским диссертациям. Новизна решений подтверждена положительными решениями на выдачу патента. Личный вклад автора не вызывает сомнений. Высокий научный и технический уровень, качество и единство теоретических и практических результатов работы, их новизна и достоверность, технико-экономическая целесообразность - характеристики данной работы.

Указанные в отзыве замечания носят частный характер и не умаляют качество этого актуального и полезного исследования.

Самого соискателя, Вишневого В. И., на основе его выступления по результатам диссертационной работы на кафедре «Приборостроение и автоматизированный электропривод» Казанского энергетического университета, личных бесед с ним официального оппонента, оценки содержания и качества разработанной им диссертации и опубликованных научных работ, можно характеризовать как

высококвалифицированного специалиста в области современных систем электропривода, вполне способного самостоятельно решать достаточно сложные научно-технические задачи, имеющие актуальное значение.

#### Заключение

1. Диссертация Вишневого В. И. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи разработки методов и алгоритмов адаптивной бездатчиковой системы управления асинхронным электроприводом с высоким качеством процессов управления.

2. Автореферат в полной мере отражает существо диссертационной работы, по объему и содержанию соответствует требованиям ВАК.

3. Работа выполнена на высоком научном уровне, имеет элементы новизны, характеризуется теоретической и практической значимостью, соответствует специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы».

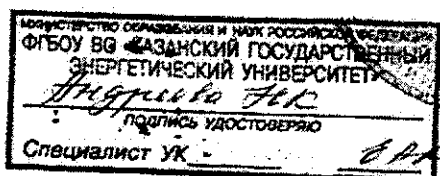
4. Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Вишневский Владимир Ильич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы.

#### Официальный оппонент

Профессор кафедры «Приборостроение и автоматизированный электропривод» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», доктор технических наук, профессор

Андреев Н.К.

«14» сентября 2016 г.



Андреев Николай Кузьмич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,

Рабочий адрес: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Тел/факс: (843) 562-43-25, 562-43-30.

E-mail: [ngeikandreev@gmail.com](mailto:ngeikandreev@gmail.com), Веб-сайт: <http://www.kgeu.ru/>