

В диссертационный совет Д212.173.04  
при ФГБОУ ВПО «Новосибирский  
государственный технический  
университет»  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., с.н.с. Полякова В.Н. на диссертацию  
Вдовина В.В. «Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых  
электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном  
регулируемости», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности  
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Частотно-регулируемый электропривод переменного тока занимает в настоящее время лидирующее положение среди других типов регулируемых электроприводов и одним из возможных путей повышения его надежности, конструктивного упрощения и снижения стоимости является исключение датчика скорости. Решение данной задачи особенно актуально для электроприводов механизмов, работающих в условиях тяжелых атмосферных воздействий, повышенных вибраций и других неблагоприятных факторов. В ряде случаев установка датчика скорости на валу оказывается просто невозможной. Среди регулируемого электропривода переменного тока особое место занимают бездатчиковые электроприводы с векторным управлением. Современные методы бездатчикового векторного управления, гарантирующие высокое качество регулирования скорости, предполагают наличие информации о значениях переменных состояния (потокосцеплений) и параметров (активных сопротивлений и индуктивностей обмоток) двигателей переменного тока в процессе функционирования электропривода. Последние изменяются в зависимости от режима работы и теплового состояния двигателей. Ввиду недоступности прямого измерения переменных состояния и параметров в реальном времени в серийных электроприводах ведущих производителей предусматривается стандартная функция идентификации параметров, которая активизируется при инициализации системы. Диапазон регулирования скорости серийных электроприводов ограничен и составляет порядка 10:1 при полосе пропускания контура скорости 5...7 Гц. Подобные характеристики оказываются далеко не всегда удовлетворительными даже для общепромышленных электроприводов. Таким образом, задача дальнейшего развития и совершенствования алгоритмов управления бездатчиковыми электроприводами сохраняет свою актуальность. Одним из перспективных направлений повышения эффективности бездатчиковых электроприводов переменного тока является

совершенствование либо разработка новых алгоритмов пассивной идентификации переменных состояния и параметров двигателей переменного тока на основе адаптивных наблюдателей. Такие алгоритмы обладают определенными преимуществами в сравнении алгоритмами активной идентификации, позволяя расширить диапазон регулирования бездатчиковых частотно-регулируемых электроприводов переменного тока. Разработке теоретически обоснованных алгоритмов оценивания координат и параметров регулируемых электроприводов переменного тока с векторным управлением посвящена диссертационная работа Вдовина В.В.

## 2. НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Новизну исследования в целом определяет разработанная обобщенная методика структурно-параметрического синтеза адаптивных алгоритмов текущего оценивания координат состояния и параметров электрических двигателей переменного тока, обеспечивающая устойчивость процесса оценивания при функционировании электропривода как в двигательном, так и в генераторном режимах работы при регулировании частоты вращения и изменении момента нагрузки. Ключевыми положениями методики являются:

- описание модели силовой части электропривода как объекта управления в пространстве состояний;
- использование в качестве настраиваемой модели адаптивного наблюдателя электромагнитных процессов полного порядка;
- осуществление синтеза алгоритма адаптивного наблюдателя методом функций Ляпунова;
- определение весовых коэффициентов ошибок наблюдения координат и коэффициентов отклонений параметров с помощью линеаризованных моделей контуров адаптации с типовыми настройками регуляторов.

Наиболее значимыми новыми результатами, на которых базируется разработанная автором обобщенная методика структурно-параметрического синтеза, являются:

1. Алгоритмы оценивания опорных векторов потокосцеплений и частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, асинхронизированного синхронного двигателя и неявнополюсного синхронного двигателя. Алгоритмы не требуют тестовых воздействий. Они используют доступную информацию о текущих значениях фазных напряжений и токов обмотки статора. Алгоритмы позволяют оценивать необходимые переменные состояния и оперативно корректировать параметры наблюдателей, зависящие от активного сопротивления обмотки статора, обеспечивая устойчивую работу электроприводов в более широких, чем ранее диапазонах регулирования частоты вращения и изменения нагрузки.

2. Результаты исследования влияния параметрических возмущений, обусловленных изменением активных сопротивлений и индуктивностей от

главного потока и полей рассеяния электрических машин, при функционировании электропривода.

3. Теоретически обоснованные методики активной предварительной идентификации параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и синхронного двигателя с постоянными магнитами, сочетающие активный эксперимент с аналитическим расчетом эквивалентных параметров цепей обмоток статора и ротора.

### 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Практическая значимость работы заключается в следующем.

Разработанные научно обоснованные алгоритмы оценивания позволяют на порядок расширить диапазон регулирования частоты вращения бездатчиковых электроприводов переменного тока с векторным управлением по сравнению с диапазоном регулирования частоты вращения серийных электроприводов. Поскольку предлагаемые алгоритмы используют пассивный способ оценивания, то они не вносят искажений в спектр выходных напряжений и токов преобразователей частоты, что исключает дополнительные энергетические затраты. Исходной информацией для функционирования алгоритмов оценивания опорных векторов потокосцеплений, частоты вращения и активных сопротивлений обмоток являются легкодоступные (с точки зрения измерения) напряжения и токи электрических двигателей.

Алгоритмы наблюдателей могут использоваться для повышения эффективности существующих векторных систем управления частотно-регулируемых бездатчиковых электроприводов, а также при разработке нового поколения комплектных электроприводов с унифицированными микропроцессорными системами управления.

Результаты диссертационной работы использованы ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск) при разработке систем управления асинхронных электроприводов подъемно-транспортных механизмов и синхронных электроприводов специального назначения, а также в учебном процессе на кафедре “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Новосибирского государственного технического университета.

### 4. ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается следующими определяющими признаками: полнотой и обстоятельностью анализа современного состояния исследований в предметной области, соответствующей теме диссертационного исследования; корректностью выбора исходных допущений при описании математических моделей силовой части электроприводов, а также постановок задач исследования;

корректностью использования апробированных аналитических и численных методов решения поставленных задач; подтверждением основных теоретических положений и выводов путем компьютерного моделирования и экспериментальным исследованием бездатчиковых электроприводов; публикациями и апробацией основных положений диссертационной работы на международном, всероссийском и региональном уровнях; использованием результатов ЗАО «ЭРАСИБ» при разработке бездатчиковых асинхронных и синхронных электроприводов общепромышленного и специального назначений.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ ДИССЕРТАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫМ КРИТЕРИЯМ

Диссертационная работа Вдовина В.В. в полном объеме отвечает всем критериям, которые установлены «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. В ней соблюдены следующие принципы соответствия.

5.1. Указанная диссертантом *цель работы* – построение на единой методической основе и исследование адаптивных алгоритмов вычисления неизмеряемых координат систем векторного управления электроприводами на базе АДКЗР, СДПМ и АДФР, пригодных для их применения в четырехквadrантном общепромышленном ЭП переменного тока с расширенным диапазоном регулирования – *реализована в рамках представленной диссертационной работы.*

5.2. *Автореферат* диссертации Вдовина В.В. *соответствует диссертационной работе* по всем квалификационным признакам: по цели, задачам исследования, актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности и др.

5.3. *Основные выводы и результаты* диссертационной работы *соответствуют поставленным задачам* исследований и сформулированы автором структурно содержательно.

5.4. *Научные публикации* Вдовина В.В., изданные в период с 2009 по 2013 гг., *соответствуют диссертационной работе* и с достаточной полнотой отражают ее существо и основные результаты исследований.

5.5. *Тема и содержание* диссертации Вдовина В.В. *соответствуют паспорту* специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» (см. курсив):

– по направлению исследования – «научной специальности, объединяющей исследования по общим закономерностям преобразования ... и использования электрической энергии, а также принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, транспортного и специального назначения. В рамках научной

*специальности объектами изучения являются... системы... электропривода, ... как самостоятельные технологические комплексы...»;*

*– по области исследования п. 1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучению системных свойств, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.2. «Обоснование совокупности технических, технологических... критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания... электротехнических комплексов и систем», п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электромеханических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и п. 4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».*

Диссертационная работа Вдовина В.В. написана доступным языком, корректным в научном и техническом отношении. Материалы и результаты исследований изложены в объеме, достаточном для понимания, четко, доступно и репрезентативно, что существенным образом помогает их восприятию. Это позволило автору раскрыть научно-техническую значимость диссертационной работы на необходимом для этого квалификационном уровне. Редакционное оформление диссертации особых замечаний не вызывает.

## 6. АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначены проблемные вопросы, определены цель и задачи исследования. Кратко изложено содержание диссертации по главам. Сформулированы научные положения, выносимые на публичную защиту, приведено доказательство обоснованности и достоверности научных положений и выводов.

В первой главе осуществлен выбор исходных математических моделей асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами, а также синхронного двигателя с постоянными магнитами. Для решения сформулированных задач исследования принята векторно-матричная форма записи уравнений моделей в пространстве состояний. Уравнения каждой модели записаны в системах координат, позволяющих в дальнейшем получить наиболее простое решение задач идентификации. В этой же главе рассматриваются принципы построения векторных систем управления электроприводов, а также приводится краткий обзор основных методов оценки переменных, используемых в настоящее время в бездатчиковых электроприводах с векторным управлением.

Во второй главе рассмотрены известные наиболее распространенные алгоритмы оценивания опорного вектора потокосцеплений, частоты вращения и активного сопротивления обмотки статора для бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением: с задающей

моделью и с наблюдателями полного порядка. Показана ограниченность известных алгоритмов по области устойчивости. Выявлены причины потери устойчивости алгоритмов. Для синтеза устойчивых алгоритмов оценивания опорного вектора потокосцеплений, частоты вращения ротора и активного сопротивления асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором разработана новая методика, которая базируется на следующем принципе. В качестве настраиваемой модели используется модель наблюдателя электромагнитных процессов полного порядка, а в качестве эталонной модели – непосредственно двигатель. С помощью метода функций Ляпунова синтезированы законы адаптации наблюдателя. Предложена инженерная методика расчета коэффициентов пропорционально-интегрального закона адаптации наблюдателя. Выявлены особенности поведения коэффициентов от скорости и момента нагрузки электропривода. Приведены результаты математического моделирования бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением. Для определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя, необходимых для работы алгоритма оперативного оценивания, предложен алгоритм предварительной идентификации параметров.

В третьей главе дается методика синтеза алгоритма вычисления вектора потокосцеплений, обусловленных постоянными магнитами, частоты вращения ротора и активного сопротивления обмотки статора неявнополюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами. Проведен анализ устойчивости одного из известных алгоритмов оценивания, использующего понятие расширенной ЭДС. Доказано, что алгоритм оценивания на основе расширенной ЭДС теряет устойчивость в области малых частот вращения. Для расширения области устойчивой работы алгоритма оценивания неизменяемых координат синхронного двигателя предлагается вычислитель с наблюдателем полного порядка. С помощью метода функций Ляпунова получены законы адаптации. Показано, что коэффициент передачи адаптера по сопротивлению статора должен изменяться согласно положению рабочей точки на механической характеристике электропривода. Предложен алгоритм предварительной идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами. В этой же главе даны рекомендации по запуску электропривода турбомеханизмов.

В четвертой главе рассмотрена методика синтеза алгоритма оценивания опорного вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора асинхронизированной синхронной машины. Показано, что известные алгоритмы оценивания неустойчивы в области малых частот вращения либо на синхронной и подсинхронной частотах вращения. С помощью метода функций Ляпунова синтезированы закон адаптации наблюдателя и матрица стабилизирующей добавки. Приведены результаты математического

моделирования бездатчикового электропривода с предлагаемым алгоритмом. В этой же главе сформулирована обобщенная методика структурно-параметрического синтеза адаптивных алгоритмов текущего оценивания координат состояния и параметров электромеханических систем переменного тока.

В пятой главе основное внимание уделено описанию методики проведения и анализу результатов экспериментальных исследований бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением. Представлены результаты исследования чувствительности алгоритма оценивания с задающей моделью к отклонению параметров двигателя. Экспериментально исследован известный адаптивный наблюдатель полного порядка и предлагаемый алгоритм оценивания на базе наблюдателя полного порядка. Экспериментально выявлена область неустойчивой работы известного алгоритма с задающей моделью. Экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы и прогнозы по диапазону регулирования частоты вращения бездатчикового асинхронного электропривода.

## 7. ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

7.1. Дискуссионными представляются структура и приведенный материал первой главы. По моему мнению, основой первой главы должен быть аналитический обзор методов оценки координат, применяемых моделей для решения задач идентификации и структур регулируемых бездатчиковых электроприводов переменного тока с различными типами двигателей, а итоговым результатом главы – постановка задач исследования.

7.2. В диссертационной работе моделирование процессов проведено с использованием простейшей модели преобразователя частоты, то есть без учета дискретности преобразователя. Также не учитывается квантование по времени, присущее цифровой реализации алгоритмов управления. В связи с этим возникает вопрос о влиянии углового запаздывания, вызванного наличием мертвого времени и квантования по времени, на точность идентификации при малых значениях скорости, соответствующих заявленному диапазону регулирования частоты вращения 100:1.

7.3. Исходной информацией для функционирования алгоритмов являются основные гармоники фазных напряжений и токов статора либо ротора. В работе отсутствуют описание способа фильтрации высших гармоник и оценка влияния фазовых сдвигов, вносимых фильтрацией, на процессы идентификации.

7.4. В диссертационной работе приведены только структуры систем управления бездатчиковых электроприводов при однозонном регулировании скорости. Можно ли распространить предлагаемые алгоритмы на бездатчиковые асинхронные и синхронные электроприводы при двухзонном регулировании скорости?

7.5. При описании экспериментальных установок отсутствует информация о способах формирования выходного напряжения преобразователей частоты, настройках регуляторов и быстродействии систем регулирования используемых в эксперименте бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением.

## 8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа Вдовина В.В. является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней решена важная задача отраслевого значения – разработаны и практически применены научно обоснованные адаптивные алгоритмы оценивания координат и параметров электрических двигателей, которые позволяют без снижения надежности и экономичности расширить диапазон регулирования частоты вращения электроприводов переменного тока общепромышленных механизмов.

Основные научные выводы и практические рекомендации сделаны на основе глубокого анализа физических процессов в бездатчиковых электроприводах как сложных электромеханических систем, а также влияния внутренних и внешних факторов на режимы их работы. В этой связи содержание представляемой работы полностью соответствует паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Содержание диссертации соответствует ее названию и поставленным задачам. Результаты исследований представлены в общепринятой для таких работ форме: графиков, осциллограмм и таблиц. Основные выводы и заключение сформулированы достаточно полно и отражают суть полученных результатов исследований.

Основные научные результаты диссертации широко опубликованы. По диссертации имеется 18 публикаций в научных изданиях, в том числе 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты доложены и обсуждены на конференциях международного уровня и с этих позиций соответствуют требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертация полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата наук.

На основании изложенного считаю, что автор работы Вдовин Владимир Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент –

доктор технических наук (специальность 05.09.03),  
старший научный сотрудник, профессор кафедры «Электропривод  
и автоматизация промышленных установок»

Уральского энергетического института  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»



В.Н. Поляков

Подпись В.Н. Полякова удостоверяю  
Начальник службы делопроизводства  
«17» апреля 2014 года

Н.В. Гончарова



Вступил в силу 24.04.2014г. 