

На правах рукописи



Афанасьев Кирилл Сергеевич

РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
РОБАСТНОСТЬЮ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Глазырин Александр Савельевич

Официальные оппоненты: Каширских Вениамин Георгиевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры электропривода и автоматизации
ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Хамитов Рустам Нуриманович, доктор
технических наук, доцент, профессор кафедры
«Электрическая техника» ФГБОУ ВПО «Омский
государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится 16 декабря 2015 г. в 18:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан « » октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 212.269.11



Дементьев Ю.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Асинхронный электропривод (АЭП) является основой для автоматизации многих современных технологических процессов. К преимуществам АЭП следует отнести, во-первых, использование в его составе асинхронных двигателей (АД), обладающих простотой конструкции, высокими эксплуатационными характеристиками, а также низкой удельной стоимостью по сравнению с другими типами электродвигателей. Во-вторых, применение преобразователей частоты, выполненных на полностью управляемых полупроводниковых ключах, позволяет организовать полеориентированное управление АД с расширенным диапазоном регулирования, улучшенными показателями качества динамических процессов, а также возможностью регулирования электромагнитного момента. Использование современных цифровых сигнальных процессоров (ЦСП или DSP – Digital Signal Processor), специализирующихся на задачах управления электроприводом, например, TMS320, обеспечивает согласование ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов электропривода одновременно со значительными вычислительными возможностями DSP серии Motor Control для управления процессами в режиме реального времени.

Параметры современных высокопроизводительных сигнальных процессоров позволяют применять в составе системы управления АЭП устройства косвенного оценивания координат – наблюдатели состояния, что дает возможность отказаться от ряда датчиков, расположенных вне шкафа управления электропривода. Наиболее полно преимущества использования асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния реализуются в случаях, когда установка датчиков переменных АД нецелесообразна в связи с условиями эксплуатации электропривода, например, при работе механизмов во взрыво- и пожароопасных помещениях, химически агрессивных и радиоактивных средах, а также в условиях вибрации и значительных ударных механических нагрузок.

К одной из основных проблем при реализации систем АЭП без датчиков регулируемых координат следует отнести повышенную чувствительность электропривода к изменению его внутренних параметров в процессе эксплуатации, следовательно, разрабатываемый наблюдатель состояния двигателя должен обеспечивать параметрическую робастность асинхронного электропривода – грубость в отношении параметрических возмущений.

Значительный вклад в разработку, изучение и совершенствование асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния внесли следующие российские и зарубежные ученые: В.Г. Каширских, В.В. Панкратов, А.Б. Виноградов, И.Я. Браславский, А.М. Зюзев, Vimal K. Bose и др.

В настоящее время в указанной области научных исследований преобладает концепция разработки наблюдателя для решения узкого класса объектно-ориентированных задач, однако не уделялось должного внимания созданию наблюдателя полного порядка, способного обеспечить восстановление сигналов обратных связей для большинства основных методов управления асинхронным двигателем в условиях нечувствительности к параметрическим возмущениям в АЭП. Решение задачи по разработке такого универсального наблюдателя представляет научный и практический интерес, следовательно, настоящая работа является своевременной и актуальной.

Объект исследований: асинхронный электропривод с наблюдателем состояния.

Предмет исследований: методы синтеза наблюдателя состояния, нечувствительного к параметрическим возмущениям в асинхронном электроприводе.

Цель работы: разработка и исследование наблюдателя полного вектора состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью.

Для достижения цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выполнить сравнительный анализ существующих наблюдателей состояния асинхронного электродвигателя, выявить их основные достоинства и недостатки, наметить пути достижения поставленной цели.

2. Провести структурный и параметрический синтез наблюдателя для асинхронного двигателя с возможностью оценки полного вектора состояния, а также электромагнитного и нагрузочного моментов.

3. Разработать интегральный критерий параметрической робастности асинхронного электропривода, замкнутого по выходным сигналам наблюдателя состояния. Предложенный интегральный критерий должен позволять оценить степень расхождения процессов в электроприводе при нормальных условиях от процессов, происходящих при изменении внутренних параметров.

4. Экспериментально подтвердить работоспособность предложенного наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, уравнения обобщенной электрической машины, численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Достоверность и обоснованность полученных результатов диссертационной работы подтверждаются корректностью принятых допущений при составлении математических моделей, результатами имитационного моделирования в программной среде MATLAB Simulink, а также экспериментальными исследованиями на лабораторных стендах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана структура наблюдателя асинхронного двигателя, отличающаяся от существующих наличием сигнала оценки момента сопротивления, полученного путем пропорционально-интегральной отработки векторного произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невязки между измеренным и оцененным токами статора, что позволяет повысить параметрическую робастность асинхронного электропривода.

2. Предложен интегральный критерий параметрической робастности асинхронного электропривода с наблюдателем состояния, позволяющий оценить степень расхождения процессов в электроприводе, происходящих при нормальных условиях, от процессов при флуктуации внутренних параметров.

Практическая ценность работы:

1. В программной среде MATLAB Simulink создана имитационная модель асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем состояния, позволяющая на этапе разработки учесть особенности электромеханической системы и тем самым сократить срок проектирования электротехнического комплекса.

2. Разработан компонент библиотеки в визуальной среде разработки и моделирования встроенного программного обеспечения систем управления электродвигателями MexBIOS Development Studio, позволяющий снизить временные затраты на разработку и ввод в эксплуатацию новых асинхронных электроприводов производственных механизмов с наблюдателями состояния.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура наблюдателя полного вектора состояния, электромагнитного момента и момента сопротивления на валу асинхронного электродвигателя.

2. Методика расчета интегрального критерия параметрической робастности асинхронного электропривода с наблюдателем состояния.

3. Результаты исследования параметрической робастности асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем.

4. Результаты экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2009 г.); на Отраслевых научно-технических конференциях «Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности» ТААЭП-2010, ТААЭП-2011 (г. Северск, 2010, 2011 гг.); на Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2010, НТИ-2011, НТИ-2012 (г.Новосибирск, 2010-2012 гг.); на XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2011 (г. Томск, 2011 г.).

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены в ООО НПФ «Мехатроника-Про», а также использованы в проекте-победителе №02/09-2012 «Создание лабораторного комплекса по разработке современных интеллектуальных средств динамической идентификации, эксплуатационной диагностики внутренних повреждений, отказоустойчивой эксплуатации синхронных генераторов и электрических машин электроприводов собственных нужд тепловых электростанций» по результатам III Межвузовского конкурса исследовательских проектов по направлению: Традиционная и атомная энергетика, альтернативные технологии производства энергии.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, 1 патент РФ на изобретение, 7 тезисов в материалах научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений, выполнена на 106 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 11 таблиц. Список использованной литературы состоит из 86 наименований. Приложения приведены на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, представлены цель и задачи научных исследований, сформулированы научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены методы научных исследований и положения, выносимые на защиту.

В первой главе описан подход к построению структуры асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния. Выявлена основная проблема систем с наблюдателями, заключающаяся в повышенной чувствительности к изменению внутренних параметров двигателя. Произведен сравнительный анализ существующих пассивных методов оценивания состояния асинхронного двигателя – расширенного фильтра Калмана (РФК), наблюдателя полного порядка (НПП), метода адаптивной системы с задающей моделью (АСЗМ).

На основании проведенного анализа в конце главы сформулирована цель работы и определены задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке наблюдателя состояния, позволяющего повысить степень параметрической робастности асинхронного электропривода.

Описан общеизвестный подход к построению наблюдателей состояния асинхронных электродвигателей. Представлена математическая двухфазная модель АД в неподвижной системе координат α - β в форме пространства состояний, удобная для синтеза наблюдателя.

Оценку электромагнитных переменных разработанным наблюдателем предлагается производить по классической теории наблюдателей динамических объектов:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A \cdot \hat{x}(t) + B \cdot u(t) + K \cdot [y(t) - \hat{y}(t)], \\ \hat{y}(t) = C^T \cdot \hat{x}(t) \end{cases},$$

где $\hat{x}(t)$ – вектор оцененных электромагнитных переменных состояния двигателя; $u(t)$ – вектор управляющих воздействий; $y(t)$ и $\hat{y}(t)$ – векторы измеряемых переменных и их оценок наблюдателем; A – матрица параметров двигателя; B – матрица параметров управляющих воздействий; C – матрица, компоненты которой определяют техническую возможность измерения переменных состояния; $[y(t) - \hat{y}(t)]$ – невязка между реальными и наблюдаемыми выходными координатами; K – матрица усиления наблюдателя.

Отличительной чертой разработанного наблюдателя является использование пропорционально-интегральной обработки векторного произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невязки статорного тока двигателя в качестве оценки момента сопротивления на валу двигателя. В этом случае дифференциальное уравнение для оценки угловой скорости вращения выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [\hat{M}(t) - \hat{M}_c(t)] = \frac{1}{J} \cdot \left\{ K_m \cdot [\hat{\psi}_{r\alpha}(t) \cdot \hat{i}_{s\beta}(t) - \hat{\psi}_{r\beta}(t) \cdot \hat{i}_{s\alpha}(t)] - \right. \\ \left. - K_3 \cdot K_m \cdot [\hat{\psi}_{r\alpha}(t) \cdot (i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t)) - \hat{\psi}_{r\beta}(t) \cdot (i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t))] - \hat{M}_{c.int}(t) \right\}. \end{aligned}$$

Уравнение для интегральной составляющей оценки момента сопротивления:

$$\frac{d\hat{M}_{c.int}(t)}{dt} = \frac{K_m}{T_3} \cdot [\hat{\psi}_{r\alpha}(t) \cdot (i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t)) - \hat{\psi}_{r\beta}(t) \cdot (i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t))].$$

Путем имитационного моделирования в программной среде MATLAB Simulink доказана работоспособность разработанного наблюдателя, как при параллельной работе с двигателем, так и в составе векторной системы управления асинхронным электроприводом. Предложенные коэффициенты усиления наблюдателя позволяют использовать наблюдатель для электроприводов различной мощности. На рисунке 1 представлены переходные процессы в асинхронном электроприводе с разработанным наблюдателем при номинальных внутренних параметрах АД типа АИР90L4.

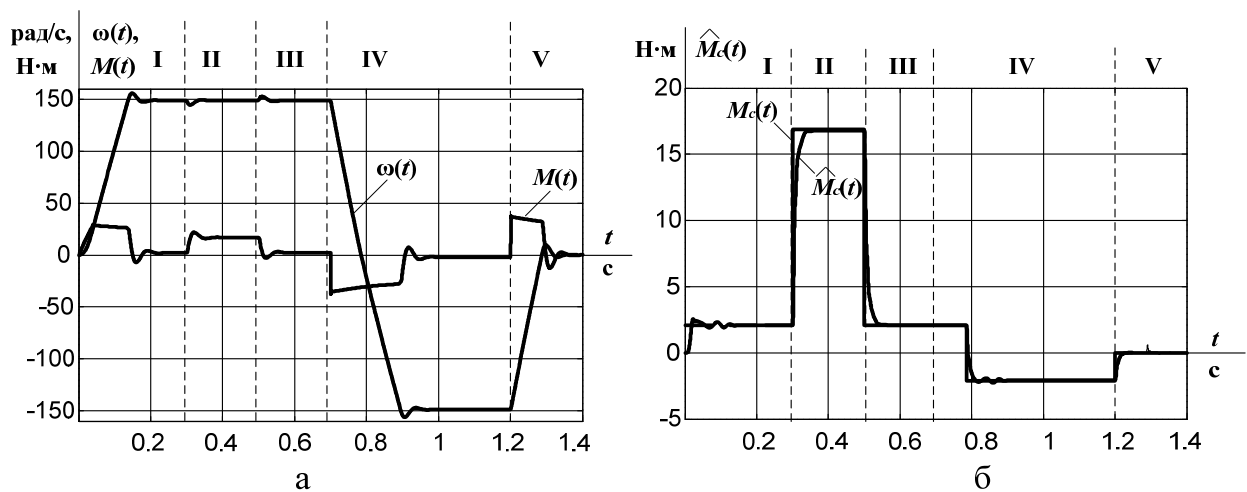


Рисунок 1. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР90L4 при номинальных внутренних параметрах АД: а – угловая частота вращения и электромагнитный момент; б – момент сопротивления на валу и его оценка

Доказана возможность оценивания разработанным наблюдателем как электромагнитного, так и нагрузочного моментов двигателя. Для сглаживания колебаний, возникающих при оценке момента сопротивления, предложено использовать апериодический фильтр первого порядка.

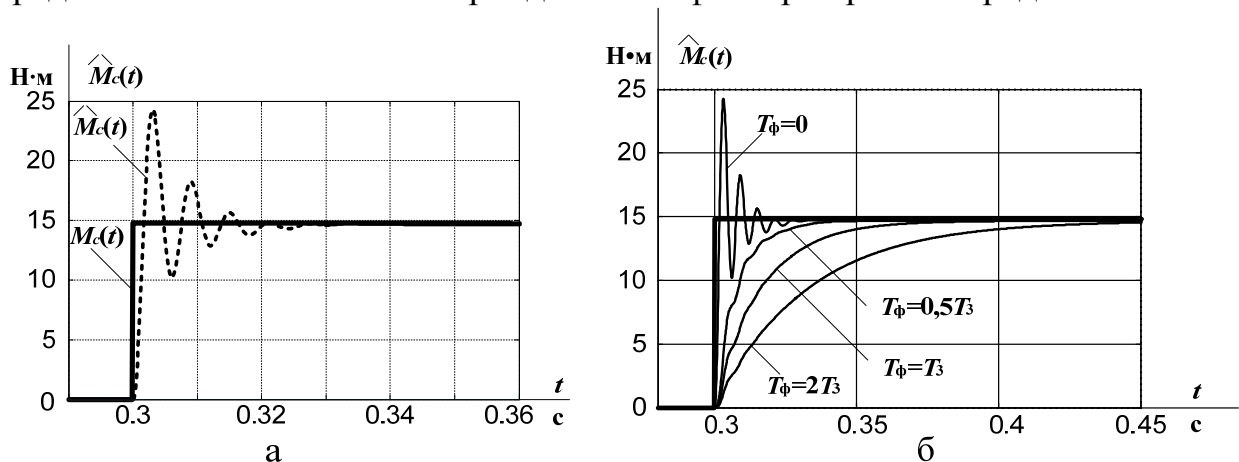


Рисунок 2. Переходные процессы оценки момента сопротивления двигателя АИР90L4 при набросе номинальной нагрузки: а – без фильтрации; б – при различных постоянных времени фильтра

Также проведено моделирование работы асинхронных электроприводов с двигателями различной мощности.

В третьей главе исследована параметрическая робастность асинхронных электроприводов с различными типами наблюдателей с целью сравнительного анализа.

В качестве квалитетической меры оценки степени чувствительности асинхронного электропривода к параметрическим возмущениям предложено

использовать интегральный критерий параметрической робастности:

$$I(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} |\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) - \omega_2(t)| dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} |\omega_2(t)| dt} \cdot 100\%,$$

где $\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t)$ – оценка угловой частоты вращения двигателя асинхронного электропривода с наблюдателем состояния; $\omega_2(t)$ – угловая частота вращения электропривода с датчиками переменных состояния; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – компоненты вектора внутренних параметров асинхронного электропривода.

Результаты численного моделирования интегрального критерия параметрической робастности представлены на рисунках 3–5.

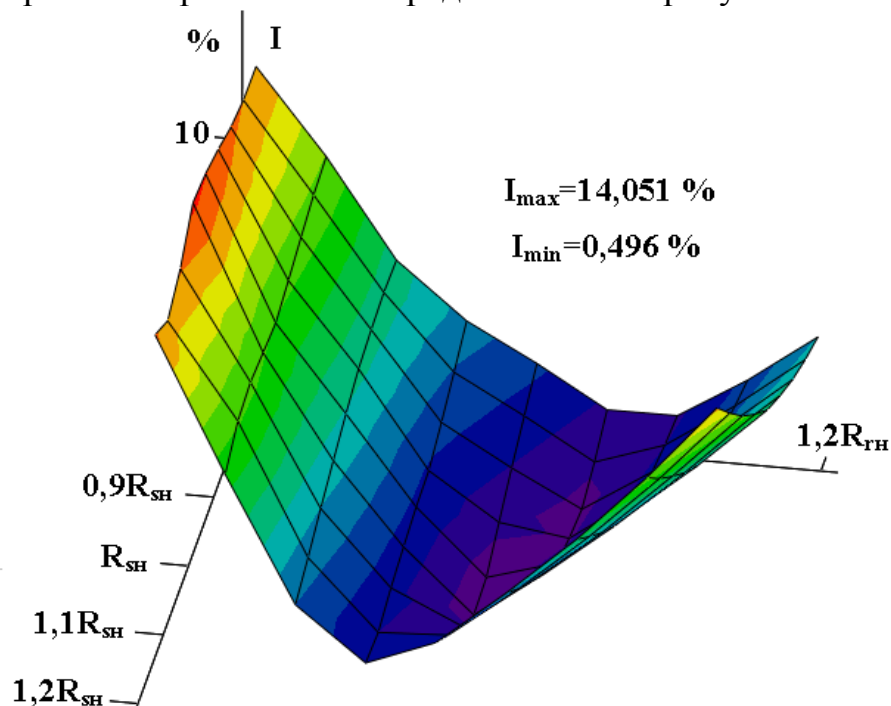


Рисунок 3. Трехмерный график зависимости интегрального критерия параметрической робастности электропривода с наблюдателем полного порядка от активных сопротивлений обмоток АД

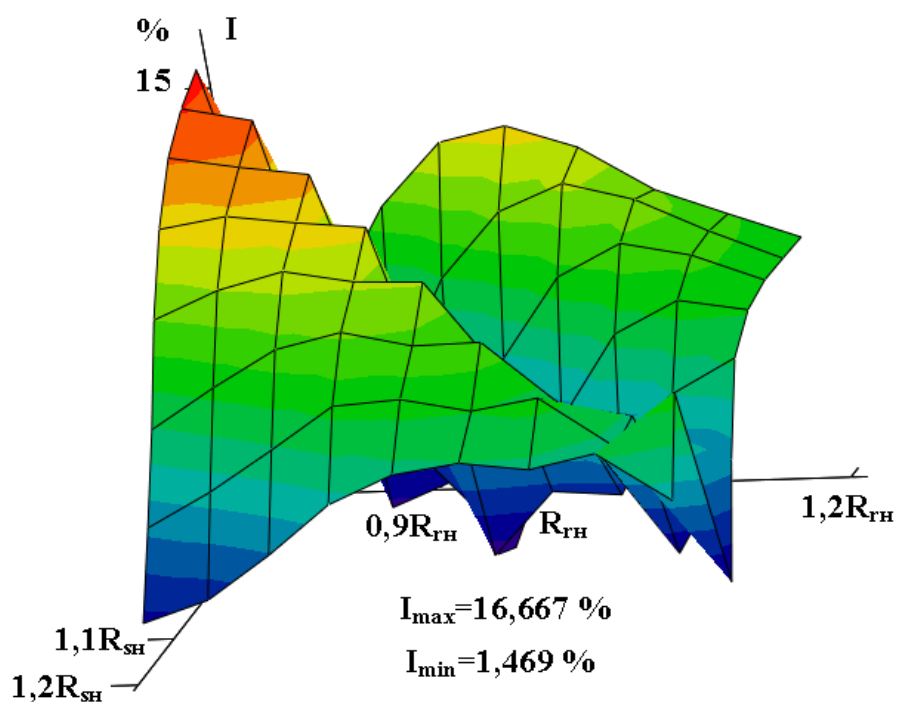


Рисунок 4. Трехмерный график зависимости интегрального критерия параметрической робастности электропривода с расширенным фильтром Калмана от активных сопротивлений обмоток АД

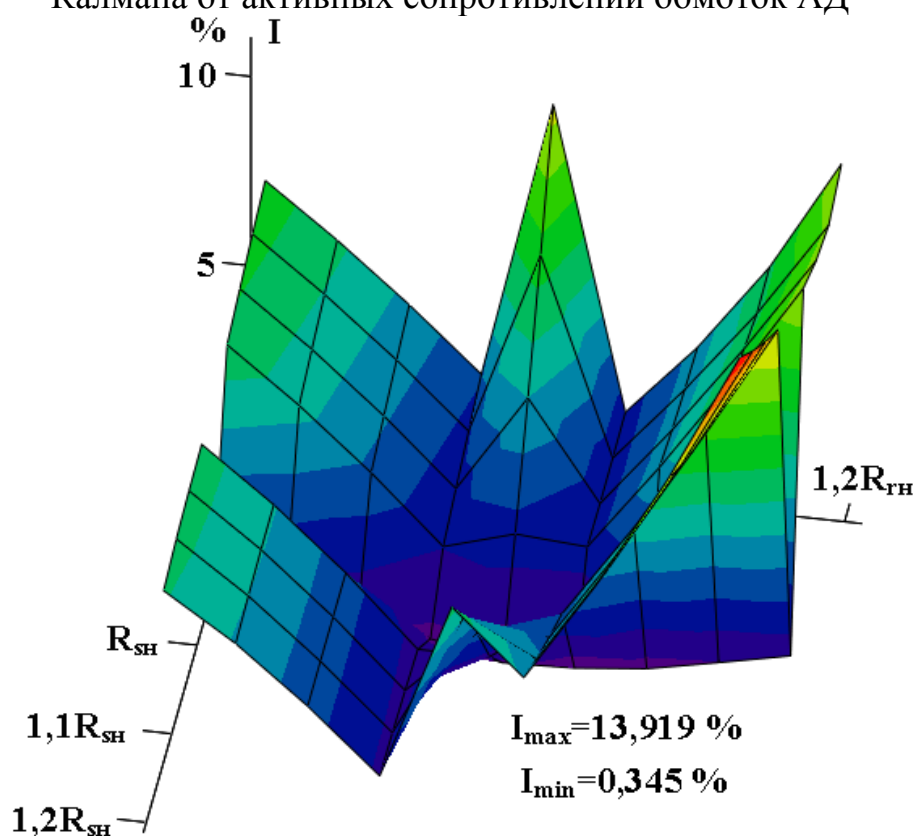


Рисунок 5. Трехмерный график зависимости интегрального критерия параметрической робастности электропривода с разработанным наблюдателем от активных сопротивлений обмоток АД

Полученные результаты доказали, что асинхронный электропривод с разработанным наблюдателем обеспечивает наименьшее значение предложенного интегрального критерия параметрической робастности по сравнению с известными аналогами – наблюдателем полного порядка и расширенным фильтром Калмана.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной апробации разработанного наблюдателя состояния АД на четырех различных стендах с двигателями разной мощности.

Для проверки работоспособности разработанного наблюдателя в условиях несимметричности и несинусоидальности статорных напряжений и токов двигателя был исследован лабораторный стенд с асинхронным двигателем мощностью $P_{2н}=90$ кВт, питающегося непосредственно от сети.

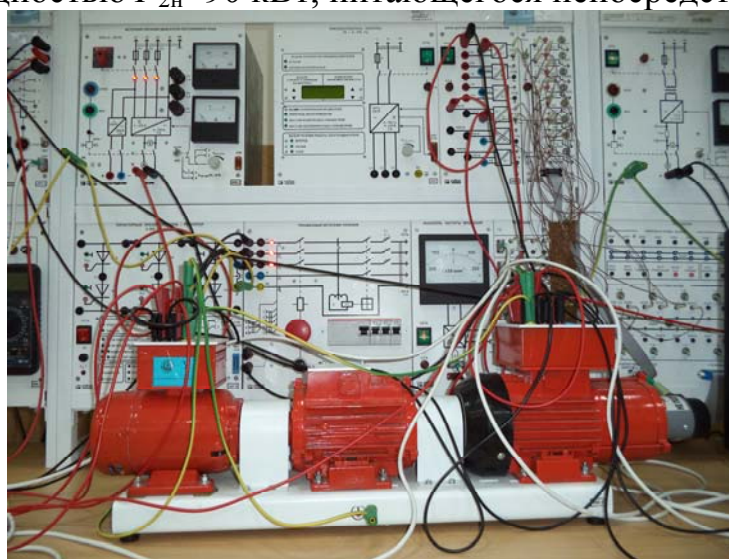


Рисунок 6. Внешний вид экспериментального стенда для проверки работоспособности разработанного наблюдателя при питании АД от трехфазной сети переменного тока

С помощью измерительной аппаратуры учебного стенда были зафиксированы массивы данных изменения угловой частоты вращения вала, а также статорных напряжений и токов электродвигателя. Измеренные напряжения и токи были импортированы в программную среду MATLAB Simulink, где производилась оценка угловой скорости вращения электродвигателя.

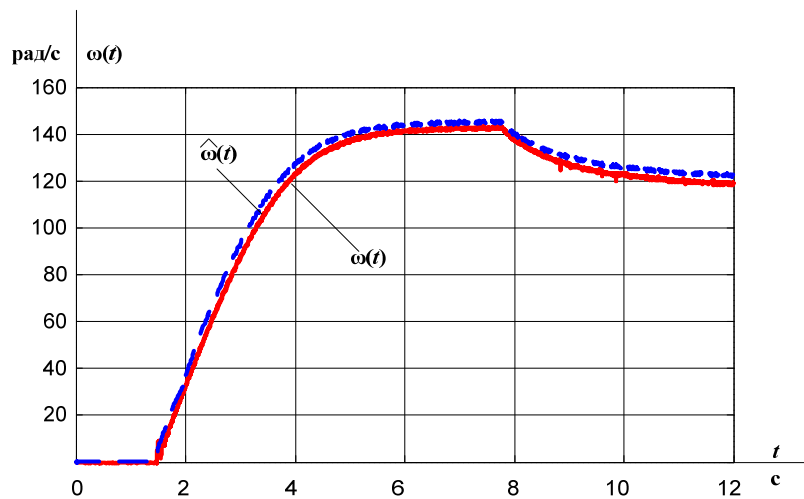
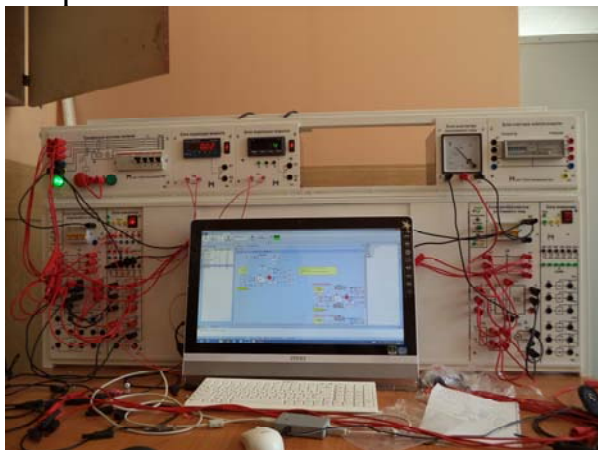


Рисунок 7. Переходные процессы угловой частоты вращения вала лабораторного двигателя мощностью $P_{2н}=90$ кВт и ее оценки при питании непосредственно от сети

Результаты эксперимента доказали работоспособность наблюдателя в условиях несинусоидальности питающих напряжений с погрешностью в установившихся режимах, не превышающей 5 %.

Для проверки возможности оценивания электромагнитного момента разработанным наблюдателем был исследован лабораторный стенд на базе асинхронного двигателя типа АИР71В2 мощностью $P_{2н}=1,1$ кВт с установленным на валу датчиком момента. Питание двигателя производилось от преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения.



а



б

Рисунок 8. Внешний вид лабораторного стенда с датчиком момента:
а – панель блоков силовых преобразователей и измерительных приборов;
б – силовой агрегат

На рисунке 9 приведены переходные процессы угловой частоты вращения и электромагнитного момента на валу двигателя АИР71В2 лабораторного стенда и соответствующие им оценки наблюдателя.

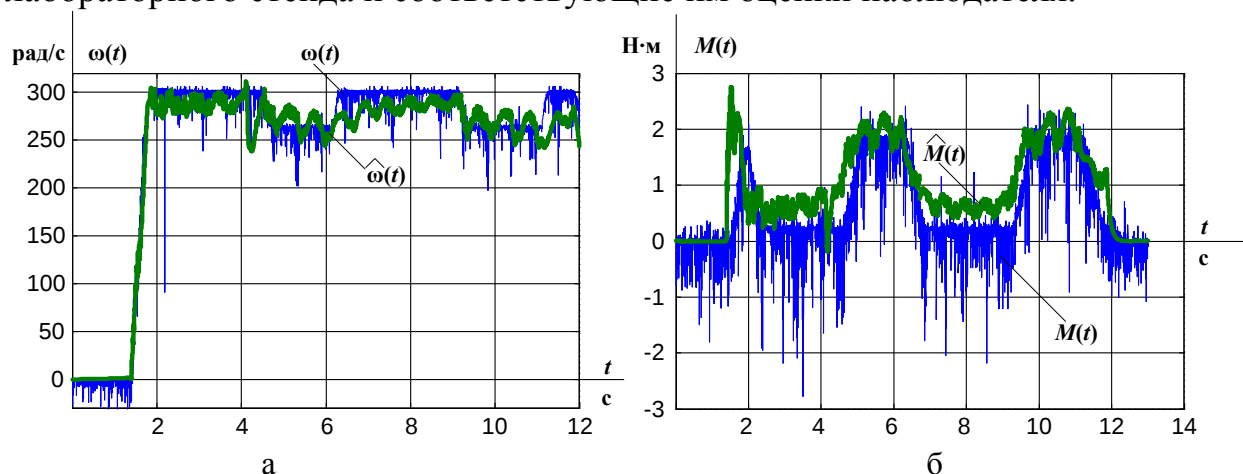


Рисунок 9. Переходные процессы в двигателе и соответствующие им оценки:
а – угловой частоты вращения вала; б – электромагнитного момента

Результаты проведенных исследований доказали возможность оценивания электромагнитного момента двигателя разработанным наблюдателем с допустимой погрешностью.

Также были проведены исследования чувствительности разработанного наблюдателя к изменению активных сопротивлений обмоток АД, что обусловлено высокой степенью влияния тепловых процессов нагрева и охлаждения двигателя на работу наблюдателя при регулировании угловой скорости АД вниз от номинальной.

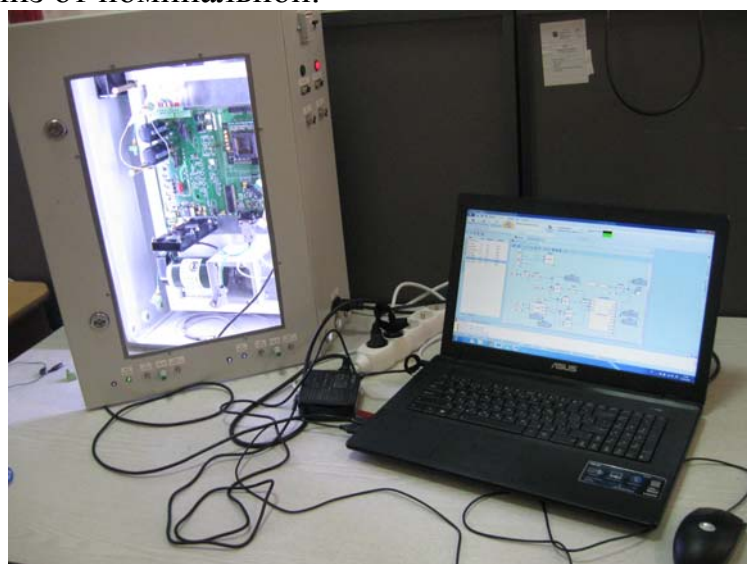


Рисунок 10. Общий вид экспериментальной установки для исследования параметрической робастности наблюдателя в режиме реального времени

В основу электромашиного агрегата стенда входил асинхронный двигатель типа УАД 72Ф мощностью $P_{2н}=70$ Вт, управление которого осуществлялось с помощью микроконтроллера TMS 320LF2812 с предустановленной во Flash-памяти операционной среды реального времени MexBIOS, где был программно реализован разработанный наблюдатель состояния двигателя.

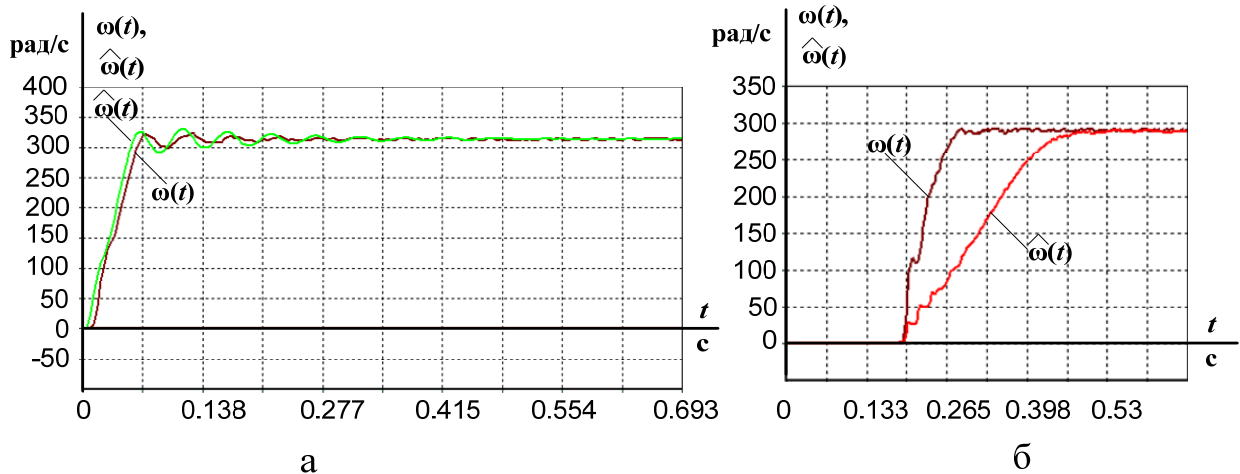


Рисунок 11. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при максимальном задании на скорость:

а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

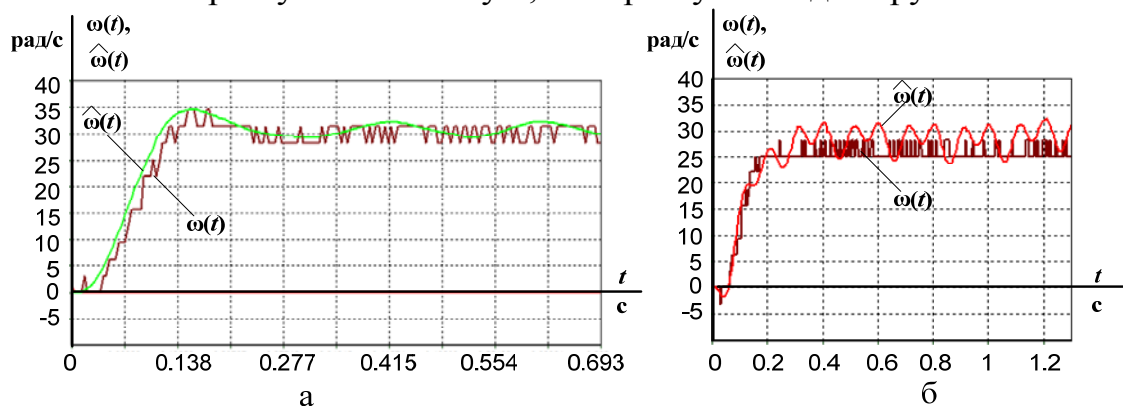


Рисунок 12. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при задании на скорость

$\omega_{зад} = 0,1\omega_{макс}$: а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

Программа исследований параметрической робастности разработанного наблюдателя заключалась в варьировании параметров наблюдателя при регулировании скорости двигателя в диапазоне 1:100 вниз от номинальной. Результаты экспериментальных исследований параметрической робастности разработанного наблюдателя представлены на рисунках 13–16.

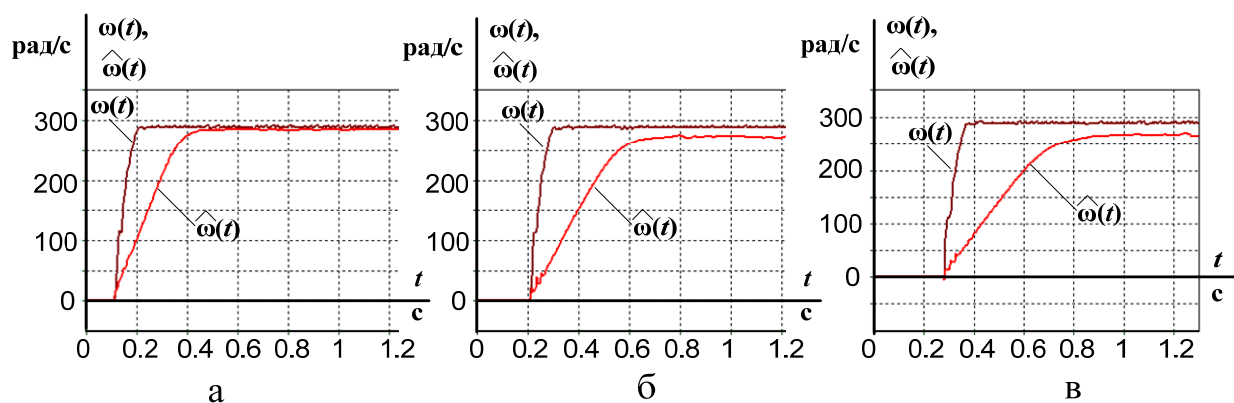


Рисунок 13. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на максимальную скорость: а – при $R_s=1,2R_{SH}$; $R_r=1,2R_{TH}$; б – при $R_s=1,4R_{SH}$; $R_r=1,4R_{TH}$; в – при $R_s=1,6R_{SH}$; $R_r=1,6R_{TH}$

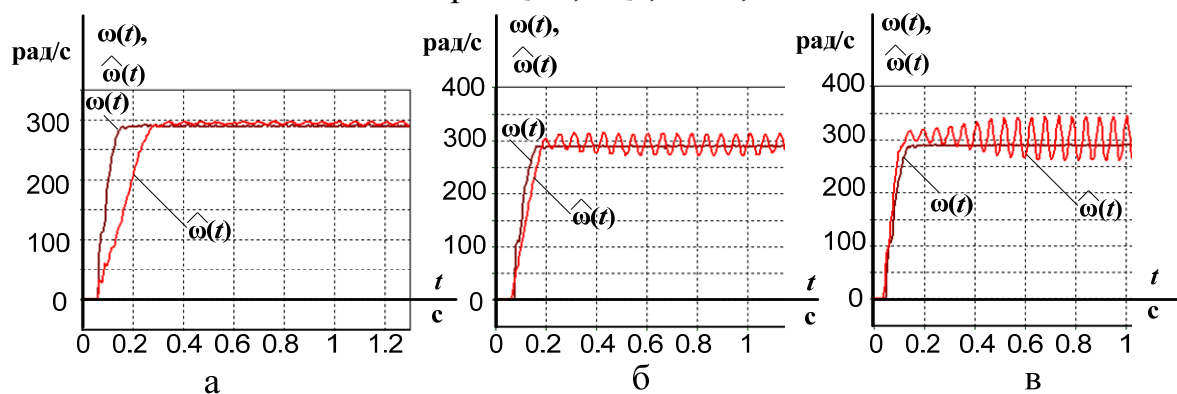


Рисунок 14. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на максимальную скорость: а – при $R_s=0,8R_{SH}$; $R_r=0,8R_{TH}$; б – при $R_s=0,6R_{SH}$; $R_r=0,6R_{TH}$; в – при $R_s=0,4R_{SH}$; $R_r=0,4R_{TH}$

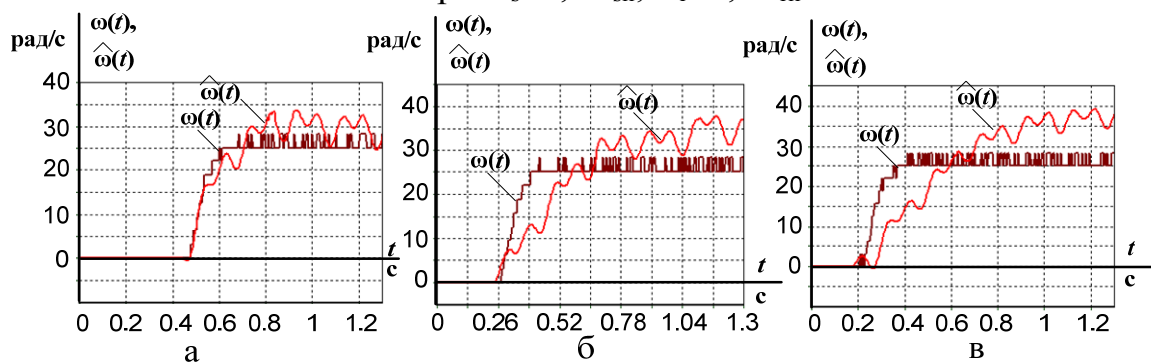


Рисунок 15. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на минимальную скорость: а – при $R_s=1,2R_{SH}$; $R_r=1,2R_{TH}$; б – при $R_s=1,4R_{SH}$; $R_r=1,4R_{TH}$; в – при $R_s=1,6R_{SH}$; $R_r=1,6R_{TH}$

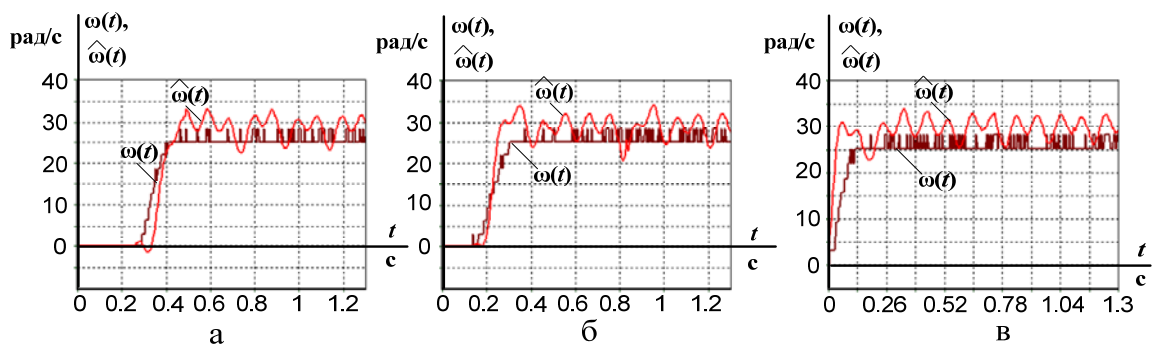
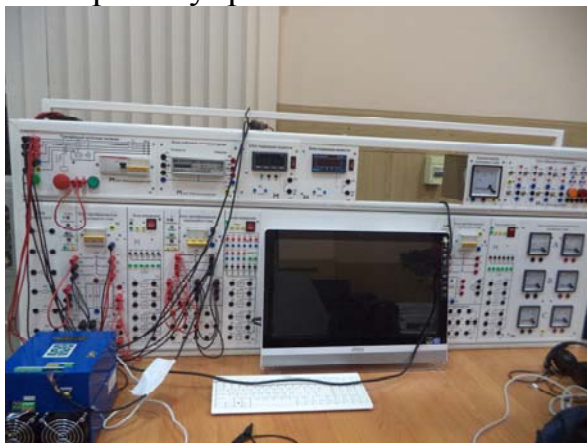


Рисунок 16. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на минимальную скорость: а – при $R_s=0,8R_{SH}$; $R_r=0,8R_{rH}$; б – при $R_s=0,6R_{SH}$; $R_r=0,6R_{rH}$; в – при $R_s=0,4R_{SH}$; $R_r=0,4R_{rH}$

Результаты проведенных исследований доказали работоспособность наблюдателя в реальном времени при изменении активных сопротивлений обмоток в пределах от $0,4R_H$ до $1,6R_H$ при диапазоне регулирования скорости двигателя 1:100, что подтверждает высокую степень параметрической робастности разработанного наблюдателя.

Исследования работоспособности разработанного наблюдателя в режимах изменения скорости электропривода, реверса и останова проводились на асинхронном электроприводе на базе двигателя АИР90L4 с векторным управлением.



а



б

Рисунок 17. Внешний вид лабораторного стенда с электродвигателем АИР90L4: а – панель блоков силовых преобразователей и измерительных приборов; б – силовой агрегат

Результаты исследований работы наблюдателя в реальном времени при ненулевых начальных условиях представлены на рисунках 18–19.

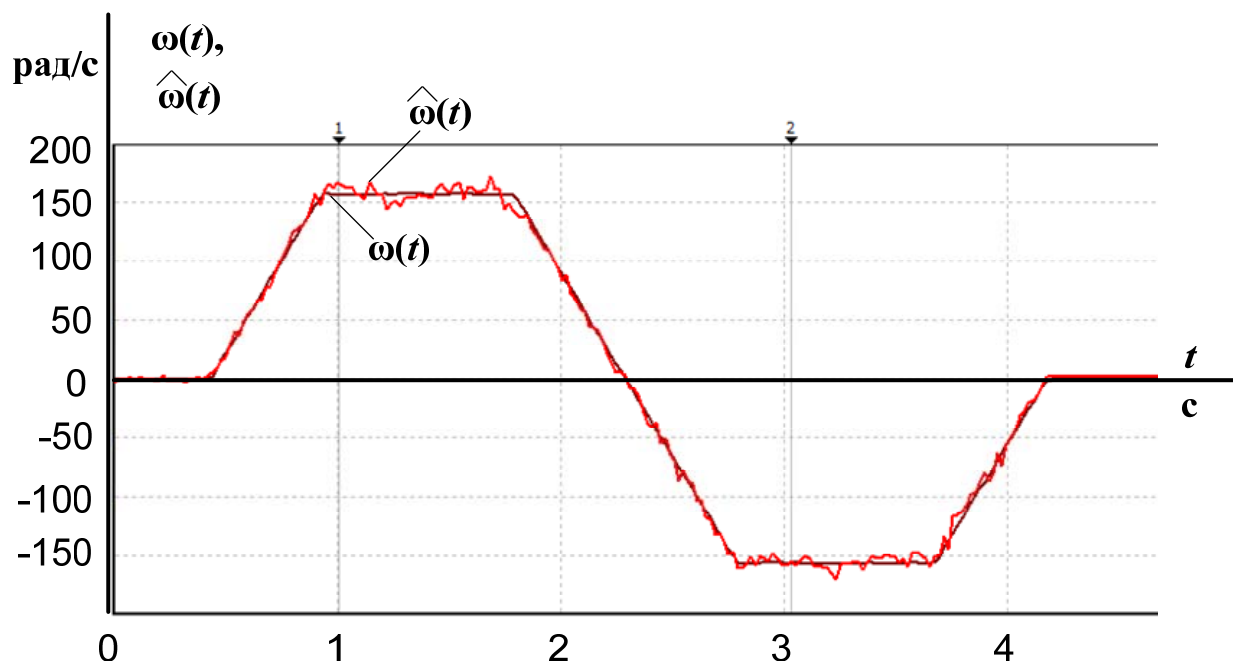


Рисунок 18. Переходные процессы угловой скорости вращения двигателя и ее оценки разработанным наблюдателем при пуске электропривода на номинальную скорость, реверсе и останове

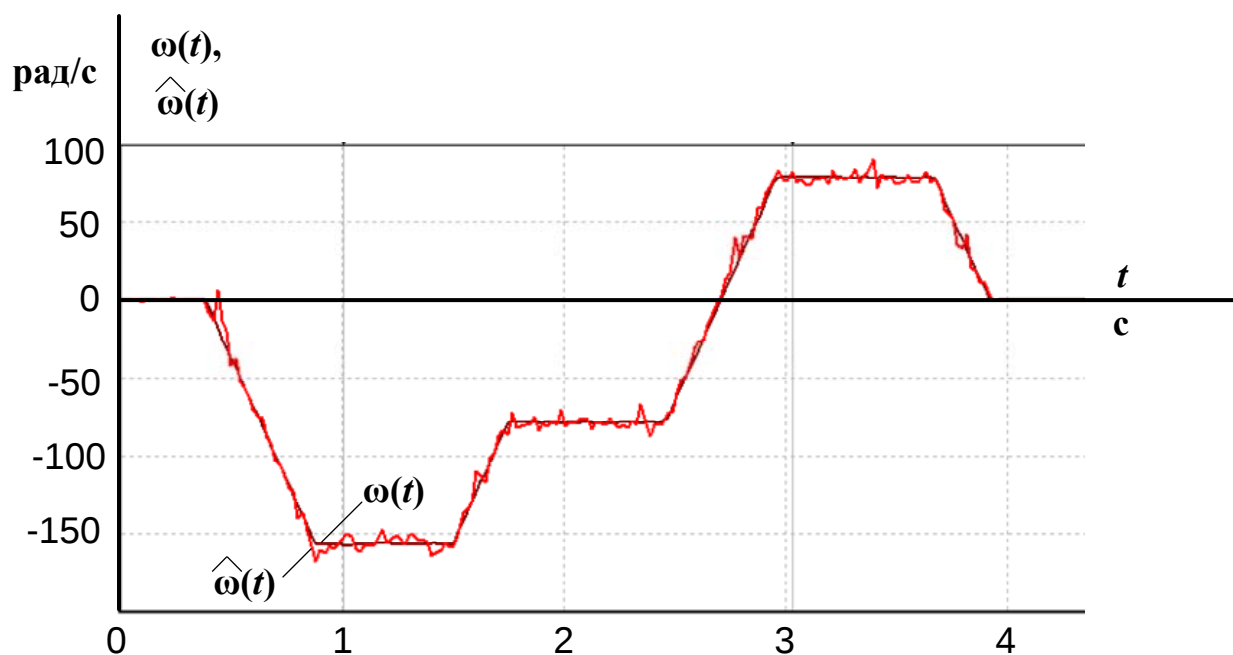


Рисунок 19. Переходные процессы угловой скорости вращения двигателя и ее оценки разработанным наблюдателем при пуске электропривода на номинальную скорость, понижении скорости, реверсе и останове

В результате эксперимента было доказано, что наблюдатель способен оценивать скорость вращения двигателя при ненулевых начальных условиях в режимах пуска асинхронного электропривода, реверса и останова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Предложена структура наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя, отличающаяся от существующих аналогов тем, что в качестве закона адаптации оценки угловой скорости вращения предложено использовать пропорционально-интегральную обработку векторного произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невязки между измеренным и оцененным токами статора для создания сигнала оценки момента сопротивления на валу двигателя, что позволяет оценить полный вектор состояния электродвигателя, а также повысить степень параметрической робастности асинхронного электропривода.
2. Предложенная методика настройки параметров наблюдателя доказала возможность применения его для асинхронных электроприводов различной мощности.
3. В качестве квалиметрического подхода к оценке степени чувствительности асинхронного электропривода с наблюдателем состояния к неконтролируемым параметрическим возмущениям предложен интегральный критерий параметрической робастности.
4. Исследование параметрической робастности выявило, что асинхронный электропривод с разработанным наблюдателем имеет наименьшее значение предложенного интегрального критерия $I=13,9\%$ при максимальном отклонении активных сопротивлений на 20% от номинальных значений, чем известные аналоги – расширенный фильтр Калмана ($I=16,7\%$) и наблюдатель полного порядка ($I=14,051\%$), что доказывает более высокую степень параметрической робастности разработанного наблюдателя.
5. Экспериментально подтверждены работоспособность разработанного наблюдателя в условиях несимметричности и несинусоидальности входных сигналов, а также его высокая параметрическая робастность при изменении активных сопротивлений обмоток в пределах от $0,4R_n$ до $1,6R_n$ в диапазоне регулирования скорости вала двигателя 1:100.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Афанасьев, К.С. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, Л.Е. Козлова // Известия Томского политехнического университета, 2010. – Т. 317 – № 4. – С. 120–123.
2. Афанасьев, К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, К.С. Афанасьев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011 – №. 6 – С. 57–62.

3. Афанасьев, К.С. Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012 – №. 1 (25) – С. 2–7.
4. Афанасьев, К.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012 – №. 4 (28) – С. 66–69.
5. Афанасьев, К.С. Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 4. – С. 24–30.

в патентах и свидетельствах на программы

6. Афанасьев, К.С. Пат. № 2438229 РФ. МПК H02P 21/13 (2006.01), H02P 27/08 (2006.01). Устройство управления асинхронным двигателем / Л.Е. Козлова, Т.А. Глазырина, А.С. Глазырин, С.В. Ланграф, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев. Заявка № 2010131978; Оpubл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 6 с.: ил.

в трудах международных и межрегиональных конференциях, конгрессах и т.д.

7. Афанасьев, К.С. Идентификация параметров и переменных состояния асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции – Томск, 13–16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 413–415.
8. Афанасьев, К.С. Исследование робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором на основе фильтра Калмана / К.С. Афанасьев, Т.А. Глазырина, А.С. Глазырин // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы отраслевой научно-технической конференции – Северск, 17-21 мая 2010. – 2010: СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 81
9. Афанасьев, К.С. Моделирование работы векторного асинхронного электропривода с расширенным фильтром Калмана в цепи обратной связи / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы Отраслевой научно - технической конференции, Северск, 16-20 Мая 2011. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 41.
10. Афанасьев, К.С. Бездатчиковый векторный асинхронный электропривод с наблюдателем Калмана // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых - Новосибирск, 3-5 декабря 2010. – Новосибирск: НГТУ, 2010 – т. 2. – с. 181-183.
11. Афанасьев, К.С. Области применения идентификации состояния асинхронных электродвигателей / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Наука,

технологии, инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2-4 Декабря 2011. – Новосибирск: НГТУ, 2011 – С. 74-79.

12. Афанасьев, К.С. Определение скорости вращения асинхронного электродвигателя на основе экспериментальных данных / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 29 ноября-2 декабря 2012. – Новосибирск: НГТУ, 2012 – ч. 5 – С. 261-262.

13. Афанасьев, К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для оценки координат асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 18-22 Апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011 – Т. 1 – С. 402-403 – 1 опт. электрон. диск (CD - ROM).

Подписано в печать 13.10.2015. Тираж 100 экз.
Кол-во стр. 20. Заказ 33-15
Бумага офсетная. Формат А5. Печать RISO.
Отпечатано в типографии ООО «РауШ мбх»
634034, г.Томск, ул. Усова 7, оф. 046.
Тел. 8-9528074686