

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Афанасьев Кирилл Сергеевич

РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
РОБАСТНОСТЬЮ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Глазырин А.С.

Томск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	9
1.1. Подход к построению систем асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния.....	9
1.2. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков известных наблюдателей состояния асинхронных электродвигателей.....	13
1.3. Выводы по первой главе.....	16
2. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО К ИЗМЕНЕНИЮ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ.....	17
2.1. Общий подход к построению наблюдателей состояния динамических объектов.....	17
2.2. Математическое описание асинхронного двигателя в форме пространства состояний, удобной для синтеза наблюдателя.....	20
2.3. Разработка структуры наблюдателя состояния асинхронного двигателя, малочувствительного к изменению внутренних параметров.....	27
2.4. Имитационное моделирование работы асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем.....	37
2.5. Выводы по второй главе.....	43
3. ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ.....	44
3.1. Введение понятия интегрального критерия параметрической робастности асинхронного электропривода с наблюдателем состояния.....	44
3.2. Исследование параметрической робастности асинхронного электропривода с помощью предложенного интегрального критерия.....	46
3.3. Исследование изменения статической ошибки асинхронного электропривода при вариации граничных отклонений активных сопротивлений обмоток электродвигателя.....	51
3.4. Выводы по третьей главе.....	54
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ.....	55
4.1. Идентификация скорости вращения вала асинхронного двигателя при питании от промышленной сети переменного тока с несимметричностью и несинусоидальностью фазных напряжений.....	55

4.2. Идентификация скорости вращения вала и электромагнитного момента асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты.....	64
4.3. Экспериментальное исследование в режиме реального времени параметрической робастности разработанного наблюдателя.....	68
4.4. Отработка наблюдателем ненулевых начальных условий в режиме реального времени.....	78
4.5. Выводы по четвертой главе.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	83
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя АИР90L4.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Имитационные модели асинхронного электропривода с наблюдателем состояния в программной среде MATLAB Simulink.....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Текст программного кода разработанного наблюдателя в среде MexBIOS Development Studio.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	103

ВВЕДЕНИЕ

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. Поэтому решение задачи по разработке такого универсального наблюдателя представляет научный и практический интерес, следовательно, 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.

1. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1.1. Подход к построению систем асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния

Асинхронный электропривод в настоящее время имеет практически неограниченную область применения в производственных механизмах. Это обусловлено стремительным развитием полупроводниковой и микропроцессорной техники, используемой в составе систем управления АЭП [1], а также простотой конструкции и надежностью асинхронных машин. При этом современные микроконтроллеры позволяют обеспечить высокие показатели качества работы цифрового асинхронного электропривода в статике и динамике за счет организации двухканального векторного управления АД, когда производится одновременное регулирование продольной и поперечной составляющих вектора тока статора, отвечающих за формирование магнитного потока и момента машины [2].

Ряд промышленных механизмов требует по своим условиям эксплуатации отказа от датчиков выходных переменных электропривода – положения и угловой частоты вращения ротора, потокосцепления статора или ротора, электромагнитного момента [3–7]. В случаях, когда работа электропривода осуществляется в агрессивной окружающей среде (атомные и химические производства), нестандартных климатических условиях (повышенная или пониженная температура, высокая влажность), а также при ударных и вибрационных механических воздействиях, применение датчиков, расположенных вне шкафа управления АЭП, нецелесообразно. Для исключения датчиков выходных координат двигателя в систему управления АЭП вводятся наблюдатели состояния – специальные математические

алгоритмы, позволяющие рассчитать вектор переменных состояния двигателя, недоступных для прямого измерения, с помощью информации лишь о сигналах токов и напряжений статора. Процесс косвенного определения переменных принято называть оцениванием, а выходные сигналы наблюдателя – оценками. К переменным состояния АД относят его токи, потокосцепления, угловую скорость вращения. Внутренними параметрами принято считать активные сопротивления и индуктивности обмоток, момент инерции вала.

Возможность управления АЭП без установки датчиков непосредственно на электродвигатель сопровождается существенным ограничением диапазона регулирования скорости электропривода. В большинстве случаев практической реализации значение этого показателя качества работы АЭП не превышает 1:100 [8], что накладывает ограничения на область применения систем электропривода с наблюдателями состояния.

Главным образом уменьшение диапазона регулирования вызвано высокой чувствительностью алгоритмов оценивания переменных электропривода к изменению внутренних параметров электродвигателя в процессе эксплуатации. Так, например, активные сопротивления обмоток статора и ротора меняют свои значения вследствие теплового действия протекающих по ним токов. Индуктивности электрической машины нестационарны из-за нелинейности кривой намагничивания и эффекта гистерезиса, свойственным магнитным цепям. Эквивалентный момент инерции электропривода может варьироваться в ряде случаев, когда в процессе работы механизма изменяется масса нагрузки.

Чувствительность наблюдателей состояния АД к параметрическим возмущениям обусловлена тем, что в их основе лежит математическое описание асинхронного электродвигателя, предполагающее знание его внутренних параметров, входящих в состав уравнений в виде коэффициентов перед оцениваемыми переменными состояниями. Для уменьшения степени влияния параметрических возмущений на работу АЭП совместно с

наблюдателями широко применяются алгоритмы идентификации параметров электрической машины – как предварительного, так и текущего характера [9–18]. Это позволяет адаптировать систему управления с косвенным вычислением переменных электропривода к изменению внутренних параметров в процессе работы, а также определить до начала эксплуатации системы их истинные значения, всегда отличающиеся от справочных данных. Недостатками подобного подхода являются усложнение системы управления при ее реализации на микроконтроллере, а также неточность вычисления параметров в связи с погрешностью измерений токов и напряжений двигателя, использующихся для идентификации параметров.

Одним из самых распространенных и эффективных способов управления АД является векторный с ориентацией по полю ротора [19–23]. Подобная система позволяет организовать двухканальное управление асинхронным двигателем, являющимся сложным нелинейным динамическим объектом. Одновременно с простотой структуры векторное управление позволяет получить высокие показатели качества работы электропривода, как в статике, так и в динамике. Исследованию систем бездатчиковых асинхронных электроприводов посвящены работы отечественных и зарубежных ученых [24–33]. Векторная система управления АД с наблюдателем состояния без использования алгоритмов идентификации параметров представлена на рисунке 1.1 [34].

В представленной структуре двигатель М управляется посредством двухзвенного преобразователя частоты, состоящего из выпрямителя трехфазного сетевого напряжения и инвертора, созданного на базе полностью управляемых силовых ключей – транзисторов. Регулирование открытия и закрытия ключей производится через блок драйверов четырехконтурной векторной системой управления, включающей в себя два внешних контура регулирования потокосцепления и угловой частоты вращения ротора двигателя и два внутренних контура проекций вектора тока статора на оси двухфазной системы координат.

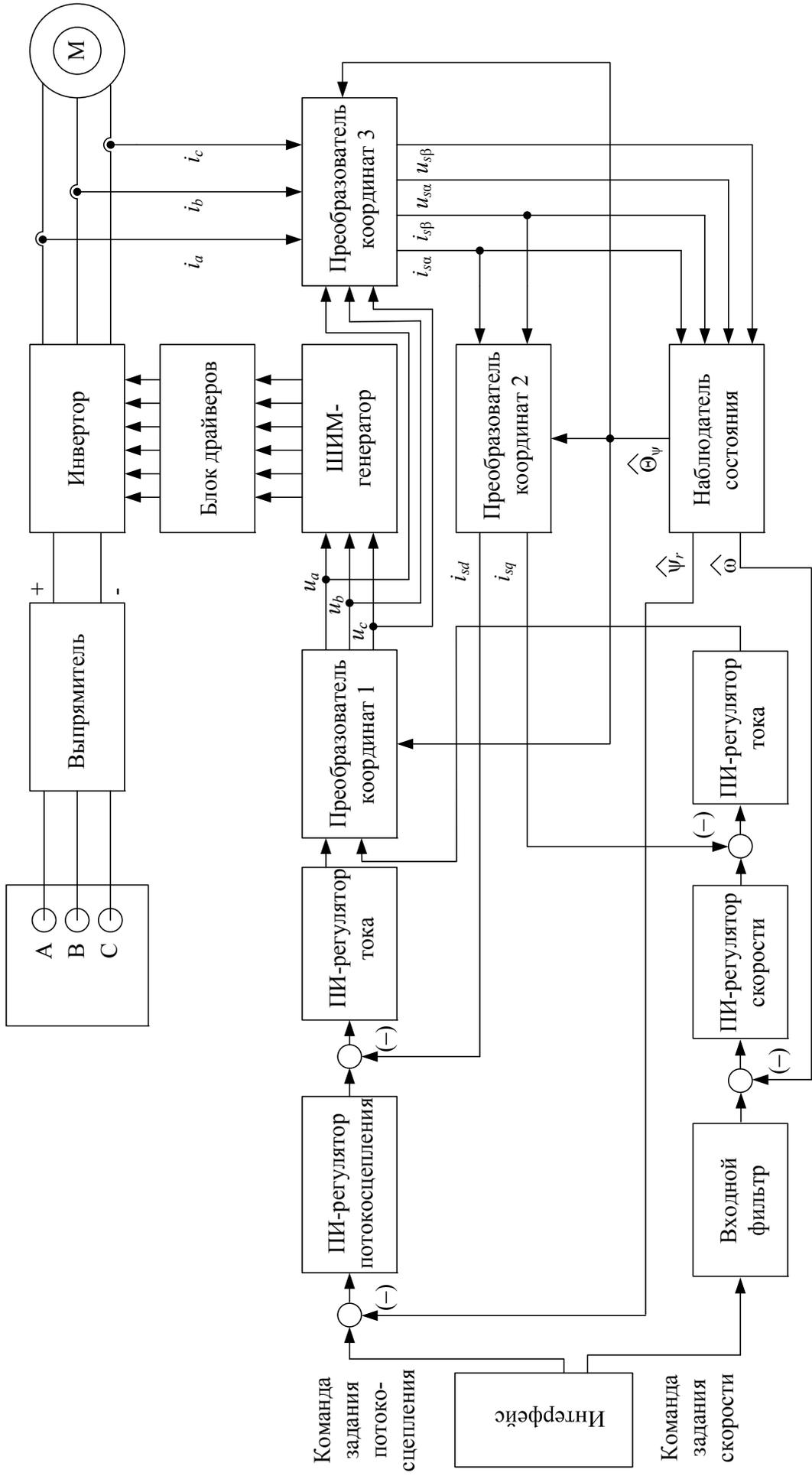


Рисунок 1.1. Структура векторной системы управления АД с наблюдателем состояния

В качестве обратных связей для внешних контуров используются выходные сигналы $\hat{\omega}$ и $\hat{\psi}_r$ наблюдателя состояния, который также рассчитывает угол поворота вектора потокосцепления ротора $\hat{\theta}_{\psi_r}$, необходимый для работы преобразователей координат (ПК).

ПК осуществляют переход из естественной системы координат А-В-С в двухфазную неподвижную α - β (ПК 3), в двухфазную вращающуюся d - q (ПК 2), в которой функционируют регуляторы, а также из вращающейся в естественную (ПК 1).

Бездатчиковая система управления предполагает измерение статорных токов i_a, i_b, i_c двигателя, а также расчет напряжений u_a, u_b, u_c на основании информации о выходных сигналах u_{sd} и u_{sq} регуляторов проекций тока статора.

Для расчета переменных состояния двигателя наблюдатель использует математическую модель двигателя в двухфазной неподвижной системе координат, поэтому входными переменными для идентификатора являются статорные напряжения $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ и токи $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ двигателя.

1.2. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков известных наблюдателей состояния асинхронных электродвигателей

Рассмотрим основные известные алгоритмы оценивания переменных состояния асинхронных электродвигателей для выявления их преимуществ и недостатков.

Одним из методов восстановления полного вектора состояния АД является фильтр Калмана – алгоритм, позволяющий оценить состояние динамической системы на основании измеренных входных сигналов в условиях сильных шумов [35–41]. Фильтр Калмана использует в своей работе помимо математического описания объекта оценивания также расчеты плотности распределения вероятности вектора оцениваемых

переменных. Применительно к асинхронному электродвигателю кроме восстановления всех величин, определяющих состояние АД, существует возможность расчета электромагнитного момента на валу двигателя [42, 43].

Расширение восстанавливаемого вектора состояния параметрами объекта в фильтре Калмана позволяет существенно повысить степень нечувствительности алгоритма к параметрическим возмущениям [44–46]. Однако расширенный фильтр Калмана обладает рядом недостатков. Во-первых, сложность и неоднозначность вызывает настройка элементов ковариационных матриц фильтра. Во-вторых, так как алгоритм калмановской фильтрации предназначен для линейных систем, то в случае использования его для оценки состояния АД, являющегося сугубо нелинейным динамическим объектом, возможно попадание оценки в локальный минимум, так как фильтр Калмана с его стохастическим математическим описанием является поисковым методом [47]. Также в реальных системах электропривода никогда не будет соблюдаться требование калмановской фильтрации к некоррелированности шумов измерения, так как всегда имеется взаимодействие сигналов электротехнических устройств, работающих в одной системе (вопрос электромагнитной совместимости) [47].

Другим известным методом оценивания состояния АД является наблюдатель полного порядка с адаптивным законом оценки скорости вала двигателя [48–52]. В отличие от фильтра Калмана указанный метод имеет детерминированное математическое описание в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Принцип действия такого алгоритма основан на оценке электромагнитного состояния двигателя при помощи классического наблюдателя Люенбергера [53] и последующем расчете скорости вращения вала АД путем пропорционально-интегральной обработки произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невзяки тока статора (разницей между реальными и оцененными значениями тока). К преимуществам адаптивного наблюдателя полного порядка стоит отнести

простоту математического аппарата, что облегчает его реализацию в микропроцессорных системах управления АЭП. Наличие существующих рекомендаций по настройке коэффициентов усиления также является преимуществом наблюдателя. К существенному недостатку наблюдателя относится высокая чувствительность к отклонениям внутренних параметров объекта оценивания [54]. В связи с тем, что для расчета скорости в уравнении движения используются не оценки проекций токов статора, а их разницы с реальными значениями, стремящиеся к нулю, наблюдатель полного порядка не способен рассчитать электромагнитный момент на валу двигателя, что ограничивает область применения метода оценивания состояния АД.

Ввиду несложности математического описания широко известен метод адаптивной системы с задающей моделью – алгоритм оценивания состояния АД, использующий совместно математические модели цепей статора и ротора двигателя [55]. В этом случае статорная модель принимается в качестве эталонной (задающей), а роторная выступает настраиваемой, за счет чего осуществляется адаптивное вычисление скорости вращения вала АД. К основным недостаткам метода адаптивной системы с задающей моделью относятся высокая чувствительность к изменению внутренних параметров объекта оценивания, а также наличие звеньев идеального дифференцирования или интегрирования [56].

В последнее время распространение получил подход к косвенному расчету вектора состояния АД с помощью искусственных нейронных сетей – алгоритмов, использующих в своей основе принцип работы человеческого мозга [57–62]. Однако сложность реализации в микропроцессорной системе управления, необходимость обучения нейронной сети, а также возможность возникновения эффекта «переобучения» делают затруднительным применение подобного алгоритма.

Все вышеописанные методы оценивания относятся к классу пассивных, так как производят восстановление вектора состояния АД на основании только информации об измеренных токах и напряжениях статора двигателя.

Активные методы связаны с воздействием дополнительных высокочастотных сигналов на статорную обмотку с целью выявления реакции двигателя [63]. При этом возникающее изменение гармонического спектра статорных напряжений и токов вызывает потери в преобразователе частоты и самой электрической машине и, как следствие, уменьшение КПД всего электропривода. В силу указанных недостатков активные методы оценивания в данной работе не рассматриваются.

Таким образом, исходя из анализа описанных методов оценивания состояния АД, можно сделать вывод о необходимости разработки улучшенного метода восстановления переменных состояния асинхронного двигателя, обладающего детерминированной математической структурой, подобной наблюдателям полного порядка, но в то же время малочувствительного к изменениям внутренних параметров двигателя.

1.3. Выводы по первой главе

1. Выявлена проблема уязвимости асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния к изменению внутренних параметров, что обусловлено физическими явлениями, происходящими в асинхронном электродвигателе.
2. Проведенный критический анализ существующих методов построения наблюдателя состояния асинхронных двигателей выявил совокупность недостатков известных подходов, выраженных в необходимости обучения и исключения явления переобучения в случае нейросетевых наблюдателей, проблеме реализации цифрового дифференцирования при использовании алгебраических методов, проблеме необходимости дополнительных исследований устойчивости стохастических методов, а также в высокой чувствительности к изменению внутренних параметров двигателя в случае наблюдателе полного порядка.
3. Установлено, что существует необходимость в разработке наблюдателя состояния для асинхронного электропривода, обладающего высокой степенью параметрической робастности.

2. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО К ИЗМЕНЕНИЮ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ

2.1. Общий подход к построению наблюдателей состояния динамических объектов

В настоящее время в теории автоматического управления широкое применение получило представление математического описания исследуемых динамических объектов (систем) в форме пространства состояний [64–68], что упрощает задачи синтеза и анализа многомерных систем, к которым относится, например, асинхронный электродвигатель. Все переменные, характеризующие динамический объект с точки зрения управления, принято разделять на три группы (рисунок 2.1):

– входные воздействия – сигналы, генерируемые системами, внешними по отношению к исследуемому объекту, и влияющие на его поведение; разделяются на управляющие u_1, u_2, \dots, u_{n_u} и возмущающие f_1, f_2, \dots, f_{n_f} ;

– выходные переменные y_1, y_2, \dots, y_{n_y} – позволяют описать поведение объекта лишь частично, на практике являются измеряемыми величинами в той или иной технической системе;

– переменные состояния x_1, x_2, \dots, x_{n_x} – полностью характеризуют динамическое поведение исследуемого объекта или системы.

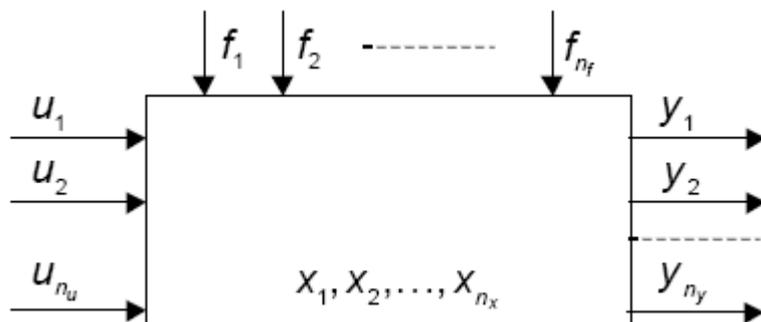


Рисунок 2.1. Объект управления

Для удобства исследования многомерной динамической системы совокупность тех или иных указанных переменных записывают в виде векторов:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_{n_u} \end{pmatrix}, \quad \vec{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_{n_f} \end{pmatrix}, \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{n_y} \end{pmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n_x} \end{pmatrix}.$$

Множество значений, которое может принять, например, вектор \vec{u} в любой момент времени, образует так называемое пространство управления. По аналогии вводятся понятия пространств возмущения, выходов, а также пространства состояний. Математическая модель динамического объекта, разрешенная относительно вектора состояния, называется формой пространства состояний. Как правило, такая форма описания объекта управления состоит из двух блоков – модели объекта и модели измерений. Первая описывается системой дифференциальных уравнений относительно вектора состояния, а вторая связывает вектор выходных (измеряемых) переменных с вектором состояния:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases}.$$

Здесь $x(t)$ – вектор переменных состояния объекта; $u(t)$ – вектор управляющих воздействий; $y(t)$ – вектор выходных или измеряемых переменных; A – матрица параметров объекта; B – матрица параметров управляющих воздействий; C – матрица, компоненты которой определяют техническую возможность измерения переменных состояния.

Подобная форма записи математического описания позволяет упростить анализ выходных процессов, устойчивости, чувствительности, управляемости и наблюдаемости динамического объекта.

Так как на практике зачастую вектор состояния не может быть измерен полностью, то с целью проведения полноценного анализа процессов в

объекте управления возникает задача расчета (восстановления) недостающих переменных состояния по имеющимся в измерительной системе сведениям. Устройства, позволяющие рассчитать полный вектор состояния на основании информации о векторе выхода, используя математическое описание объекта, называются наблюдателями состояния, а выходные сигналы этих устройств – оценками [69–71].

Впервые работоспособную структуру наблюдателя состояния динамического объекта ввел Д.Г. Люенбергер, предложив использовать в модели наблюдателя обратную связь по ошибке вектора измерения, что позволило свести к нулю ошибку оценки вектора состояния. В этом случае математическая модель наблюдателя в пространстве состояний записывается в виде:

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

где $[y(t) - \hat{y}(t)] = \varepsilon(t)$ – ошибка вектора измерения (так называемая «невязка»); K – матрица усиления наблюдателя.

При этом поведение ошибки оценивания во времени зависит от матрицы динамики наблюдателя [72]:

$$L = (A - K \cdot C),$$

распределение собственных чисел которой определяет сходимость и скорость протекания процесса оценивания.

Анализируя общепринятый подход к построению наблюдателей состояния, можно сделать вывод о том, что для синтеза наблюдателя для асинхронного электродвигателя необходимо представить математическую модель АД в форме пространства состояний. Разрешение модели двигателя относительно производных переменных состояния обусловлено также удобством решения дифференциальных уравнений в такой форме записи численными методами.

2.2. Математическое описание асинхронного двигателя в форме пространства состояний, удобной для синтеза наблюдателя

При составлении математической модели асинхронного двигателя принимают ряд допущений, общепринятых в теории электрических машин переменного тока [73, 74]:

- 1) параметры обмоток всех фаз имеют одинаковые значения, т.е. имеет место симметричный режим работы;
- 2) магнитное поле электрической машины имеет синусоидальное распределение вдоль воздушного зазора;
- 3) учитывается только первая гармоника питающего напряжения на выходе преобразователя частоты;
- 4) не учитываются потери в стали двигателя, вызываемые протеканием вихревых токов в магнитопроводе АД и его перемагничиванием;
- 5) не учитывается насыщение магнитной цепи АД благодаря наложению ограничений на статорные токи;
- 6) эффект вытеснения токов в проводниках ротора пренебрежимо мал из-за ограничения частоты токов ротора рабочим участком механической характеристики;
- 7) не учитывается неоднородность магнитной проводимости в зазоре, обусловленная наличием пазов и зубцов.

Электромагнитные процессы, протекающие в асинхронном двигателе, описываются дифференциальными уравнениями по 2 закону Кирхгофа для электрических цепей i -х фазных обмоток [75, 76]:

$$U_{si} = R_{si} \cdot I_{si} + \frac{d\Psi_{si}}{dt}, \quad U_{ri} = R_{ri} \cdot I_{ri} + \frac{d\Psi_{ri}}{dt},$$

где U_{si} , I_{si} , Ψ_{si} , U_{ri} , I_{ri} , Ψ_{ri} – напряжения, токи и полные потокосцепления статора и ротора двигателя, R_{si} , R_{ri} – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора.

Механическая система электрической машины описывается дифференциальным уравнением, составленным по 2 закону Ньютона и представляющим собой баланс моментов двигателя:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Здесь M – электромагнитный момент, создаваемый АД, M_c – момент сопротивления нагрузки, прикладываемый к двигателю, ω – угловая частота вращения ротора, J – эквивалентный момент инерции одномассовой механической системы, приведенный к валу двигателя.

Для упрощения математического описания трехфазной модели АД применяется метод представления мгновенных значений синусоидальных электромагнитных величин, действующих в обмотках машины, в форме пространственных векторов [77]. На основании теории обобщенной электрической машины, при условии равенства мощностей, возможно осуществить переход от естественной трехфазной системы координат к эквивалентной двухфазной машине, для которой математическое описание упрощается до системы дифференциальных уравнений пятого порядка [75].

В случае произвольной ориентации в системе координат x - y математическое описание электромагнитных процессов в обмотках статора и ротора примет вид [78]:

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_s \\ \bar{U}_r = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j \cdot (\omega_k - \omega \cdot z_p) \cdot \bar{\Psi}_r \end{cases}.$$

В записанных уравнениях \bar{U}_s , \bar{U}_r , \bar{I}_s , \bar{I}_r , $\bar{\Psi}_s$, $\bar{\Psi}_r$ – векторы проекций напряжений, токов и потокосцеплений статора и ротора на оси системы координат; j и ω_k – матрица поворота и произвольная угловая частота вращения системы координат соответственно; z_p – число пар полюсов электрической машины. Для наглядности представим векторы переменных в развернутой форме записи:

$$\bar{U}_s = \begin{bmatrix} U_{sx} \\ U_{sy} \end{bmatrix}; \quad \bar{U}_r = \begin{bmatrix} U_{rx} \\ U_{ry} \end{bmatrix}; \quad \bar{I}_s = \begin{bmatrix} I_{sx} \\ I_{sy} \end{bmatrix}; \quad \bar{I}_r = \begin{bmatrix} I_{rx} \\ I_{ry} \end{bmatrix}; \quad j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{\Psi}_s = \begin{bmatrix} \Psi_{sx} \\ \Psi_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s I_{sx} + L_m I_{rx} \\ L_s I_{sy} + L_m I_{ry} \end{bmatrix}; \quad \bar{\Psi}_r = \begin{bmatrix} \Psi_{rx} \\ \Psi_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r I_{rx} + L_m I_{sx} \\ L_r I_{ry} + L_m I_{sy} \end{bmatrix}.$$

Здесь L_m , L_s , L_r – индуктивности цепи намагничивания, статора и ротора двигателя соответственно.

При подобном математическом описании, исходя из уравнений баланса мощностей машины, электромагнитный момент АД возможно представить в виде векторного произведения различных комбинаций векторов токов и потокосцеплений двигателя.

Для анализа двигателя модель в форме пространственных векторов преобразуют, исключая максимально возможное количество промежуточных переменных. Это позволяет произвести декомпозицию сложной модели – представить ее в виде сочетания более простых подсистем, выходы которых представляют интерес в плане автоматического управления в зависимости от постановки задачи.

При построении векторных систем управления асинхронными электроприводами используется, в основном, математическое описание АД относительно векторов тока статора и потокосцепления ротора. Для анализа динамики произвольно вращающуюся систему координат целесообразней заменить неподвижной (стационарной), наиболее адекватно соответствующей процессам в реальном двигателе. При этом полагают $\omega_k=0$.

Не приводя известных математических выкладок, запишем математическое описание АД в неподвижной системе координат α - β в нормальной форме Коши [79]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t)] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t)] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left\{ K_m \cdot [\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t)] - M_c \right\} \end{array} \right. .$$

Здесь $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$, $U_{s\alpha}(t)$, $U_{s\beta}(t)$ – компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора; $\psi_{r\alpha}(t)$, $\psi_{r\beta}(t)$ – компоненты пространственного вектора потокосцепления ротора; $R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2$, $L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, $K_r = \frac{L_m}{L_r}$,

$A_r = \frac{R_r}{L_r}$, $K_m = 1,5 \cdot K_r \cdot z_p$ – коэффициенты, учитывающие параметры АД;

$L_s = L_{s\sigma} + L_m$, $L_r = L_{r\sigma} + L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

Параметры обмоток ротора в уравнениях считаются приведенными к обмотке статора. Также из уравнения движения двигателя видно, что электромагнитный момент представлен в данной модели в виде векторного произведения векторов потокосцепления ротора и тока статора.

Структурная схема двигателя, соответствующая приведенным уравнениям в системе координат α – β , представлена на рисунке 2.2 [79].

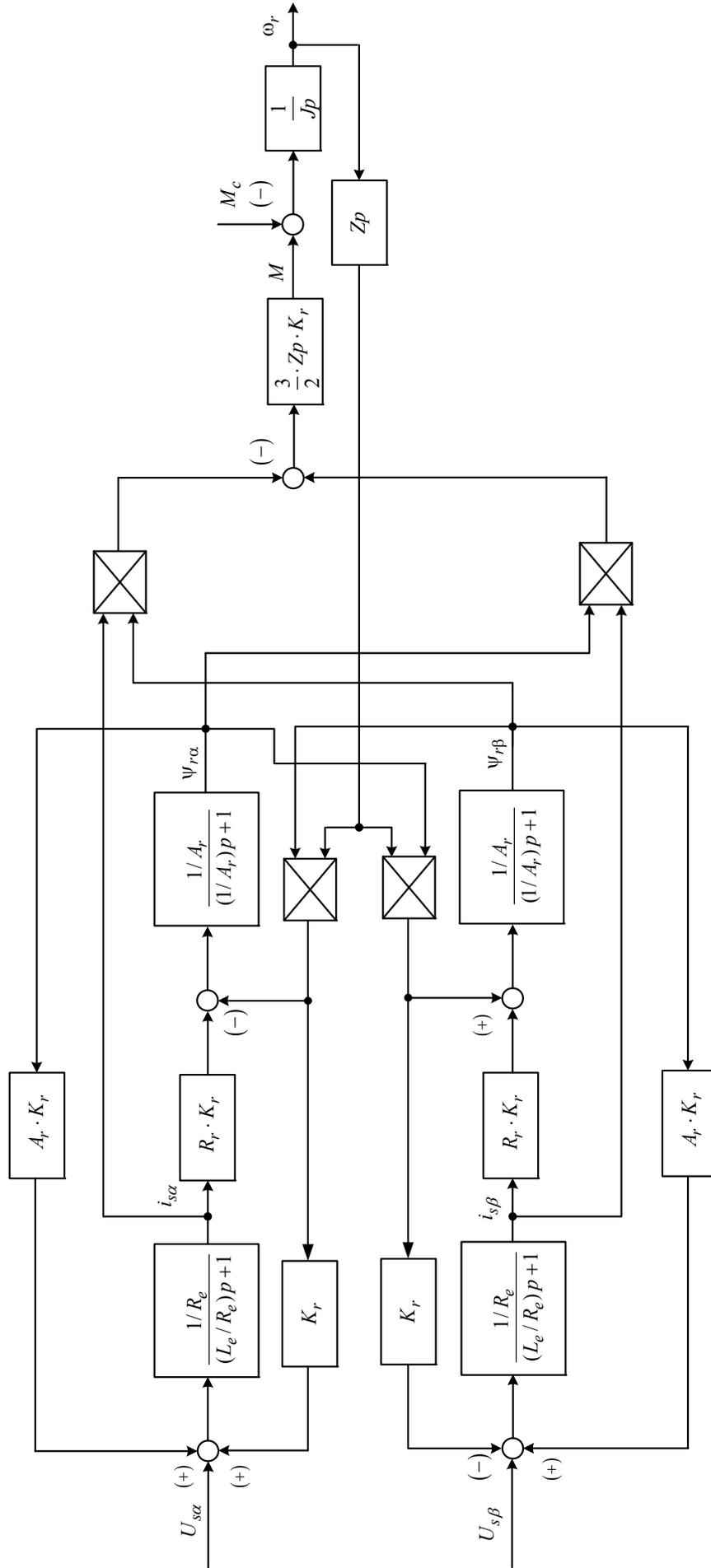


Рисунок 2.2. Структурная схема асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α - β

Переход от естественной трехфазной системы координат А-В-С к неподвижной α - β производится путем преобразования Кларка:

$$U_{s\alpha} = U_{SA}, \quad U_{s\beta} = \frac{(U_{SA} + 2 \cdot U_{SB})}{\sqrt{3}}.$$

Ввиду принятого допущения о симметричности обмоток для осуществления перехода к двухфазной системе координат достаточно знания напряжений только двух фаз двигателя.

Вышеописанную модель двигателя можно представить в векторно-матричной форме пространства состояний:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A(t) \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases},$$

где

$$x(t) = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ \psi_{r\alpha}(t) \\ \psi_{r\beta}(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \text{ — вектор состояния АД;}$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} U_{s\alpha}(t) \\ U_{s\beta}(t) \end{bmatrix} \text{ — вектор входных воздействий;}$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} & \frac{K_r \cdot z_p \cdot \omega(t)}{L_e} & \frac{K_r \cdot z_p \cdot \psi_{r\beta}(t)}{L_e} \\ 0 & -\frac{R_e}{L_e} & -\frac{K_r \cdot z_p \cdot \omega(t)}{L_e} & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} & -\frac{K_r \cdot z_p \cdot \psi_{r\alpha}(t)}{L_e} \\ R_r \cdot K_r & 0 & -A_r & -z_p \cdot \omega(t) & -z_p \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ 0 & R_r \cdot K_r & z_p \cdot \omega(t) & -A_r & z_p \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ -\frac{K_m}{J} \cdot \psi_{r\beta}(t) & \frac{K_m}{J} \cdot \psi_{r\alpha}(t) & \frac{K_m}{J} \cdot i_{s\beta}(t) & -\frac{K_m}{J} \cdot i_{s\alpha}(t) & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_e} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_e} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ – матрицы коэффициентов перед переменными состояния и}$$

входными переменными соответственно;

$y(t)$, C – вектор выходных переменных и матрица, определяющая технические возможности системы измерения переменных состояния, соответственно.

При создании асинхронного электропривода с наблюдателем состояния стремятся избавиться от участия в работе системы управления датчиков скорости и потокосцепления. В таком случае вектор выходных координат АД:

$$y(t) = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix}.$$

Тогда матрица, определяющая технические возможности системы измерения, запишется в виде:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Описанные математическая модель в форме дифференциальных уравнений, а также структурная схема асинхронного двигателя позволяют проводить анализ выходных процессов АД, а также синтез наблюдателя состояния.

2.3. Разработка структуры наблюдателя состояния асинхронного двигателя, малочувствительного к изменению внутренних параметров

Оценку электромагнитных переменных двигателя (проекций токов статора и потокоцеплений ротора) предложим производить по классической теории наблюдателей динамических объектов [80]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha}(t) \\ \hat{i}_{s\beta}(t) \\ \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \\ \hat{\psi}_{r\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} & 0 \\ 0 & -\frac{R_e}{L_e} & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} \\ R_r \cdot K_r & 0 & -A_r & 0 \\ 0 & R_r \cdot K_r & 0 & -A_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha}(t) \\ \hat{i}_{s\beta}(t) \\ \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \\ \hat{\psi}_{r\beta}(t) \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} \frac{1}{L_e} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_e} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{s\alpha}(t) \\ U_{s\beta}(t) \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{K_1}{L_e} & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{L_e} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{s\alpha}(t) \\ e_{s\beta}(t) \end{bmatrix},$$

где $\begin{bmatrix} e_{s\alpha}(t) \\ e_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t) \end{bmatrix}$ – ошибка вектора измерения (невязка статорных

токов); K_1, K_2 – коэффициенты усиления наблюдателя.

Выразим аналитические зависимости собственных чисел λ матрицы L динамики наблюдателя из уравнения:

$$\det(L - \lambda E) = 0,$$

где $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – единичная матрица.

Матрица динамики наблюдателя электромагнитных переменных асинхронного двигателя запишется в виде:

$$L = \begin{bmatrix} -\frac{R_e - K_1}{L_e} & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} & 0 \\ 0 & -\frac{R_e - K_2}{L_e} & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} \\ R_r \cdot K_r & 0 & -A_r & 0 \\ 0 & R_r \cdot K_r & 0 & -A_r \end{bmatrix}.$$

Собственные числа матрицы L находятся из уравнения:

$$\begin{vmatrix} -\frac{R_e - K_1}{L_e} - \lambda & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} & 0 \\ 0 & -\frac{R_e - K_2}{L_e} - \lambda & 0 & \frac{K_r \cdot A_r}{L_e} \\ R_r \cdot K_r & 0 & -A_r - \lambda & 0 \\ 0 & R_r \cdot K_r & 0 & -A_r - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая определитель с помощью программной среды MathCAD, получаем в итоге два уравнения:

$$\begin{cases} L_e \cdot \lambda^2 + A_r \cdot K_1 + A_r \cdot R_e + K_1 \cdot \lambda + R_e \cdot \lambda - A_r \cdot K_r^2 \cdot R_r + A_r \cdot L_e \cdot \lambda = 0 \\ L_e \cdot \lambda^2 + A_r \cdot K_2 + A_r \cdot R_e + K_2 \cdot \lambda + R_e \cdot \lambda - A_r \cdot K_r^2 \cdot R_r + A_r \cdot L_e \cdot \lambda = 0 \end{cases}.$$

Так как уравнения одинаковы, то в дальнейшем будем принимать коэффициенты усиления наблюдателя равными друг другу $K_1 = K_2$. Аналитические зависимости собственных чисел от параметров двигателя и коэффициентов усиления выглядят следующим образом:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{K_1 + R_e + A_r \cdot L_e - \sqrt{A_r^2 \cdot L_e^2 - 2 \cdot A_r \cdot K_1 \cdot L_e + 4 \cdot R_r \cdot A_r \cdot K_r^2 \cdot L_e - 2 \cdot A_r \cdot L_e \cdot R_e + K_1^2 + 2 \cdot K_1 \cdot R_e + R_e^2}}{2 \cdot L_e};$$

$$\lambda_{3,4} = -\frac{K_2 + R_e + A_r \cdot L_e - \sqrt{A_r^2 \cdot L_e^2 - 2 \cdot A_r \cdot K_2 \cdot L_e + 4 \cdot R_r \cdot A_r \cdot K_r^2 \cdot L_e - 2 \cdot A_r \cdot L_e \cdot R_e + K_2^2 + 2 \cdot K_2 \cdot R_e + R_e^2}}{2 \cdot L_e}.$$

Для устойчивой работы наблюдателя, необходимо, чтобы собственные числа его матрицы динамики располагались в левой полуплоскости комплексных координатных осей. Приравнивая зависимости для собственных чисел к нулю и решая полученное уравнение, находим коэффициент усиления, при котором происходит смена знака собственных чисел: $K_1 = K_2 = K_r^2 \cdot R_r - R_e$.

Для того, чтобы привязать коэффициент усиления к параметрам двигателя и с целью универсальности настройки в реальных системах, принимаем коэффициенты усиления $K_1 = K_2 = R_e$.

Для оценивания угловой скорости вращения вала двигателя зачастую применяют адаптивные алгоритмы, синтезируемые, например, с помощью функций Ляпунова [81].

Известна структура наблюдателя полного порядка (НПП) [80], в которой оценка скорости вращения ротора двигателя производится по следующему закону адаптации:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}(t) &= k_{\Pi} \cdot [\varepsilon(t), \hat{\psi}_r(t)] + k_{\text{И}} \cdot \int [\varepsilon(t), \hat{\psi}_r(t)] dt = \\ &= k_{\Pi} \cdot \left\{ (i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t)) \cdot \hat{\psi}_{r\beta}(t) - (i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t)) \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \right\} + \\ &+ k_{\text{И}} \cdot \int \left\{ (i_{s\alpha}(t) - \hat{i}_{s\alpha}(t)) \cdot \hat{\psi}_{r\beta}(t) - (i_{s\beta}(t) - \hat{i}_{s\beta}(t)) \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \right\} dt, \end{aligned}$$

где k_{Π} и $k_{\text{И}}$ – коэффициенты усиления закона адаптации.

Структурная схема такого адаптивного НПП представлена на рисунке 2.3. Для оценки величины частоты вращения вала АД используется пропорционально-интегральная обработка векторного произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невязки тока статора. Данный алгоритм позволяет учитывать воздействие возмущения со стороны сопротивления нагрузки на оценку частоты вращения.

Указанные в главе 1 недостатки известного адаптивного НПП, а именно высокую чувствительность к параметрическим возмущениям и невозможность оценки электромагнитного момента, предложим устранить путем использования следующего закона адаптации в качестве расчета оценки момента нагрузки на валу двигателя, а не угловой скорости [82]:

$$\hat{M}_c(t) = k_{\Pi} \cdot [\hat{\psi}_r(t), \varepsilon(t)] + k_{\text{И}} \cdot \int [\hat{\psi}_r(t), \varepsilon(t)] dt.$$

Структурная схема наблюдателя с предлагаемым законом адаптации оценки скорости представлена на рисунке 2.4. Как видно из рисунка, в итоге переменная \hat{M}_c складывается из пропорциональной $\hat{M}_{c,\text{prop}}$ и интегральной

$\hat{M}_{c.int}$ составляющих, имеет размерность [Н·м] и участвует в создании оценки динамического момента $\hat{M}_{дин}$ наблюдателя, то есть является аналогом момента сопротивления на валу двигателя. Здесь K_3 и T_3 – коэффициенты пропорционально-интегральной обработки наблюдателя, \hat{M} – оценка электромагнитного момента на валу двигателя.

Тогда дифференциальное уравнение наблюдателя для оценки угловой частоты вращения АД запишется следующим образом:

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

Уравнение для интегральной составляющей оценки момента сопротивления:

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

Таким образом, чувствительность наблюдателя АД к изменению нагрузки обеспечена созданием сигнала оценки момента сопротивления, полученного путем пропорционально-интегральной отработки произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невязки между измеренным и оцененным током статора.

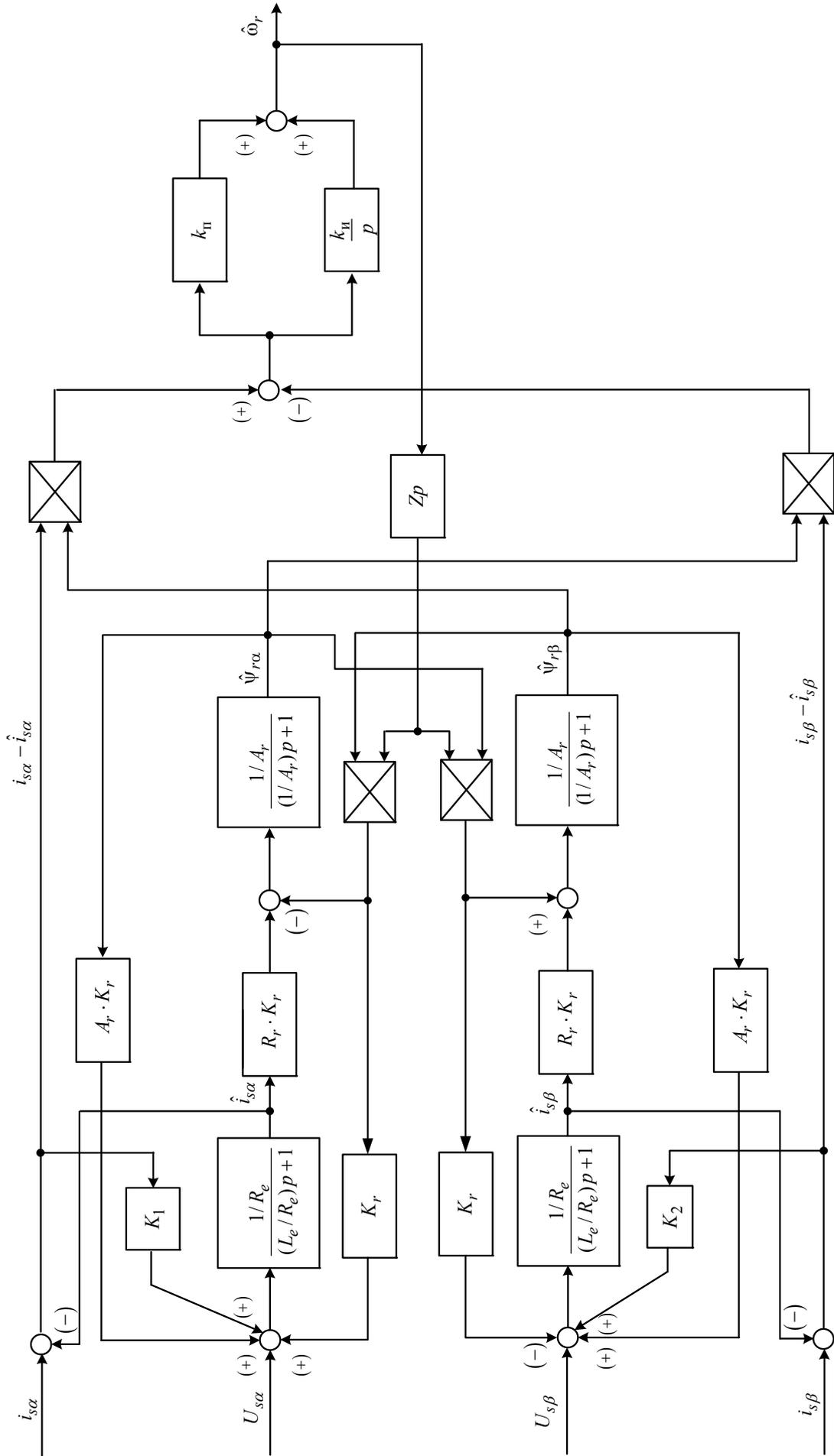


Рисунок 2.5. Структурная схема известного наблюдателя полного порядка

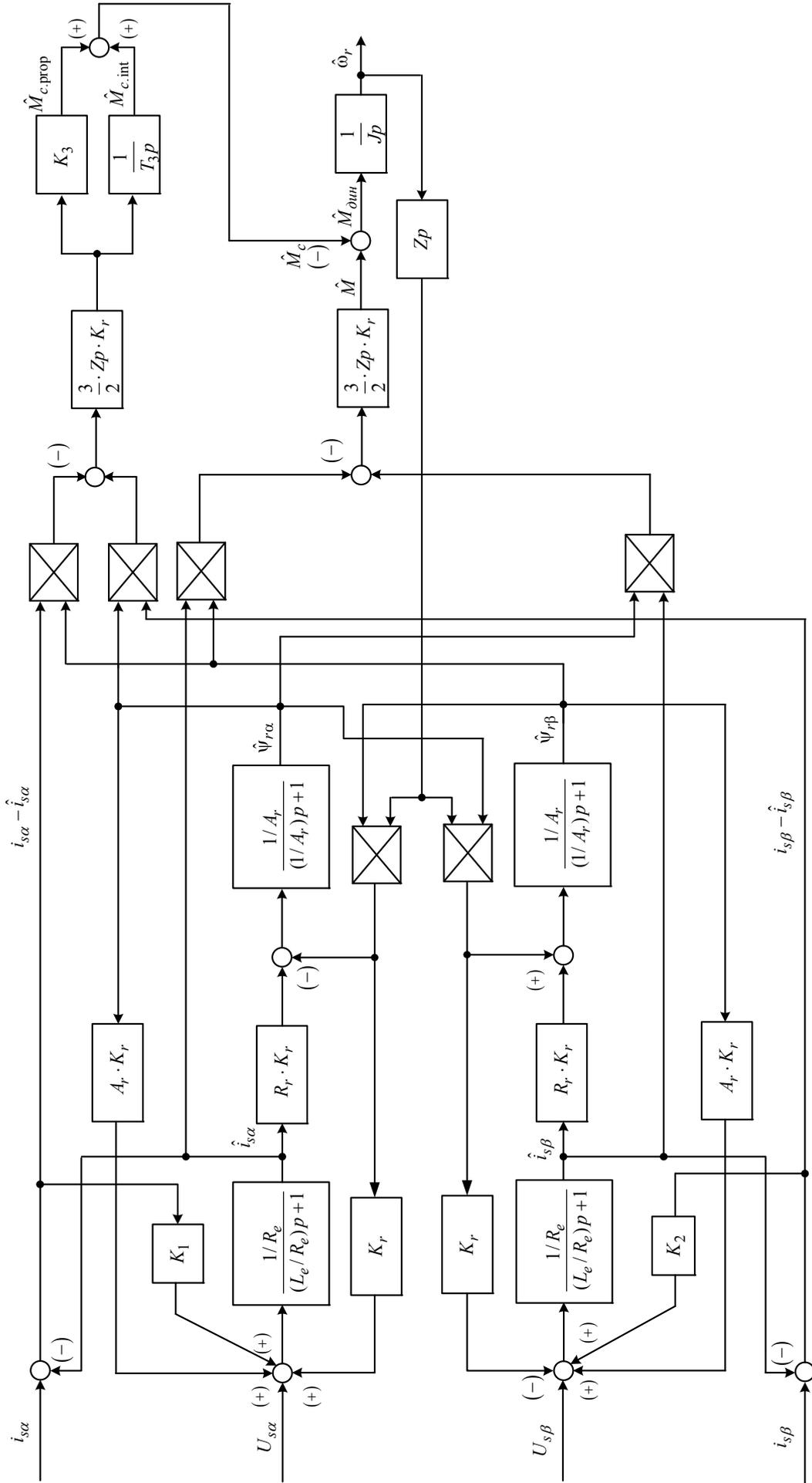


Рисунок 2.6. Структурная схема разработанного наблюдателя состояния АД

Для проверки работоспособности разработанного наблюдателя и определения оптимальных коэффициентов пропорционально-интегральной обработки сигнала, формирующего оценку момента сопротивления, в программной среде MATLAB Simulink была создана имитационная модель наблюдателя, работающего параллельно с двигателем. Расчет производился численным методом Эйлера с шагом интегрирования $\Delta t=100$ мкс. Путем моделирования было установлено, что на устойчивость и качество процесса оценивания постоянная времени T_3 наблюдателя не влияет, для дальнейших исследований было принято значение $T_3=0,1/A_r$.

На рисунках 2.5 – 2.7 представлены совмещенные графики переходных процессов угловой скорости вала электродвигателя типа АИР90L4 ($P_n=2,2$ кВт, $n_0=1500$ об/мин) и ее оценки разработанным наблюдателем при различных значениях коэффициента усиления K_3 наблюдателя при пуске АД под номинальной нагрузкой. При моделировании был учтен реактивный характер нагрузки на вал двигателя.

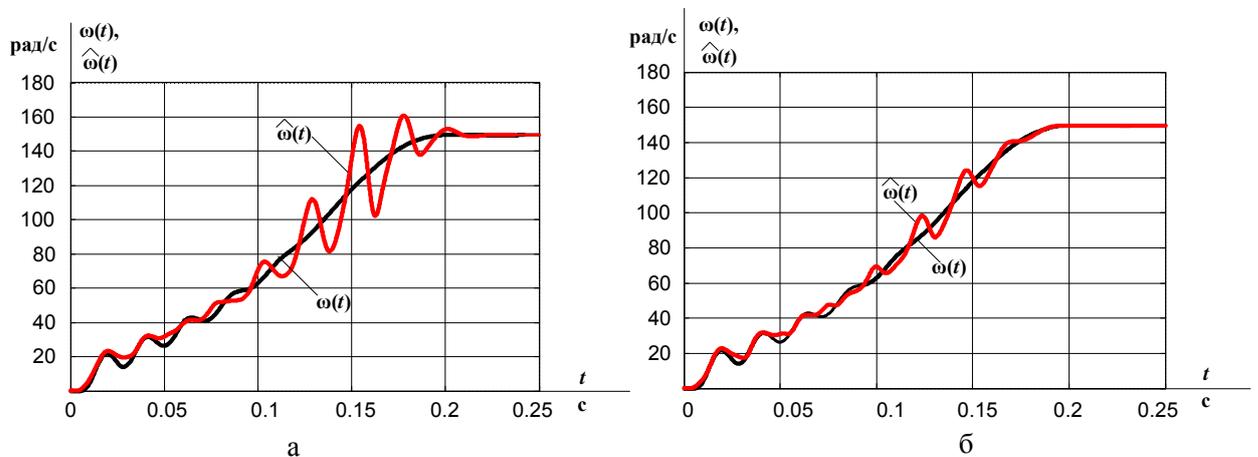


Рисунок 2.5. Переходные процессы угловой частоты вращения АД и ее оценки разработанным наблюдателем: а – при $K_3=50$; б – при $K_3=100$

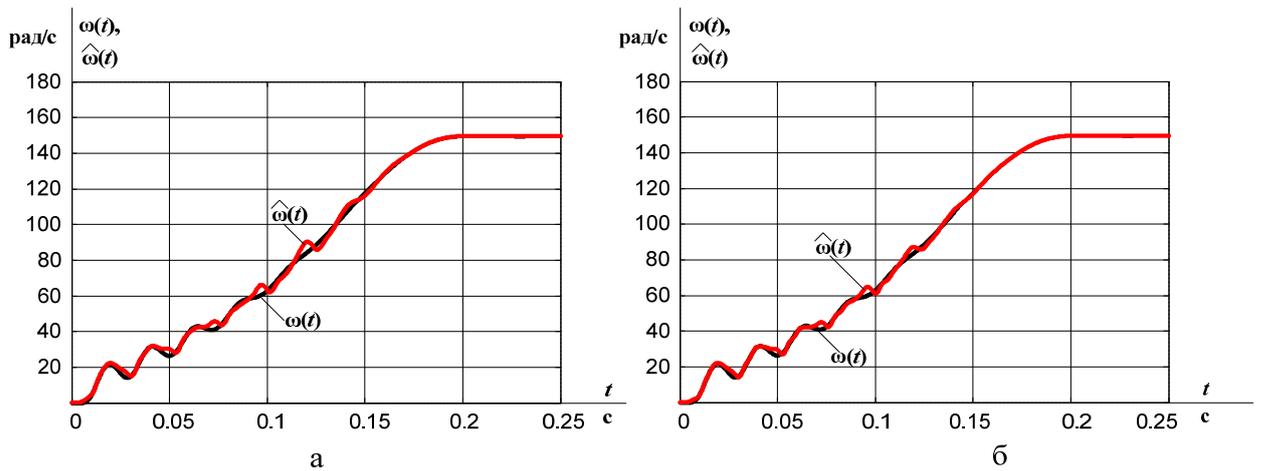


Рисунок 2.6. Переходные процессы угловой частоты вращения АД и ее оценки разработанным наблюдателем: а – при $K_3=200$; б – при $K_3=300$

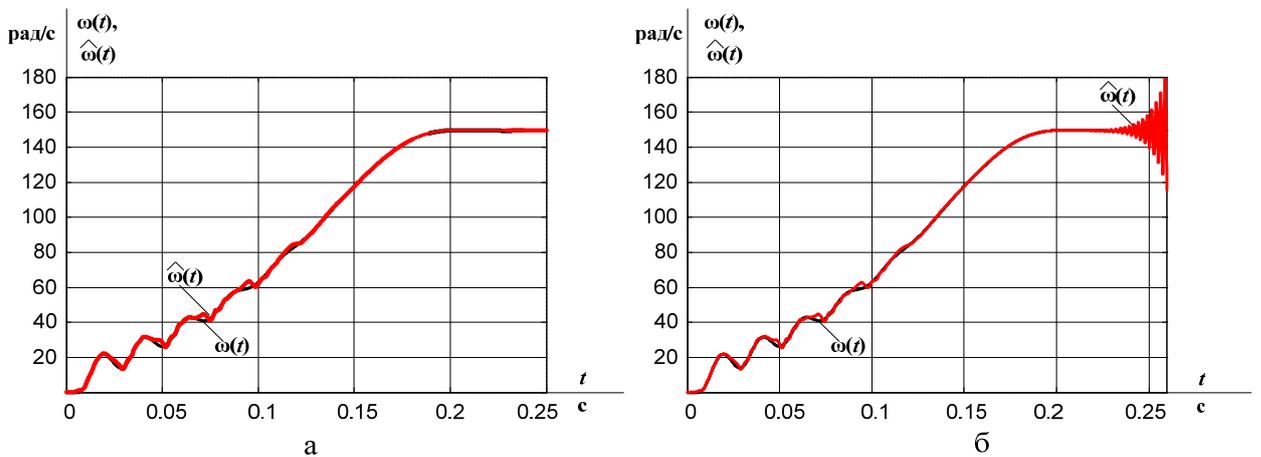


Рисунок 2.7. Переходные процессы угловой частоты вращения АД и ее оценки разработанным наблюдателем: а – при $K_3=500$; б – при $K_3=700$

Методика расчета параметров асинхронного двигателя АИР90L4 приведена в ПРИЛОЖЕНИИ А.

Исходя из полученных результатов, примем в дальнейшем коэффициент усиления разработанного наблюдателя равным $K_3=300$.

С целью проверки сходимости процесса оценивания при недостоверной априорной информации о динамическом объекте было произведено моделирование процесса пуска двигателя при неверно заданных начальных условиях наблюдателя (рисунок 2.8).

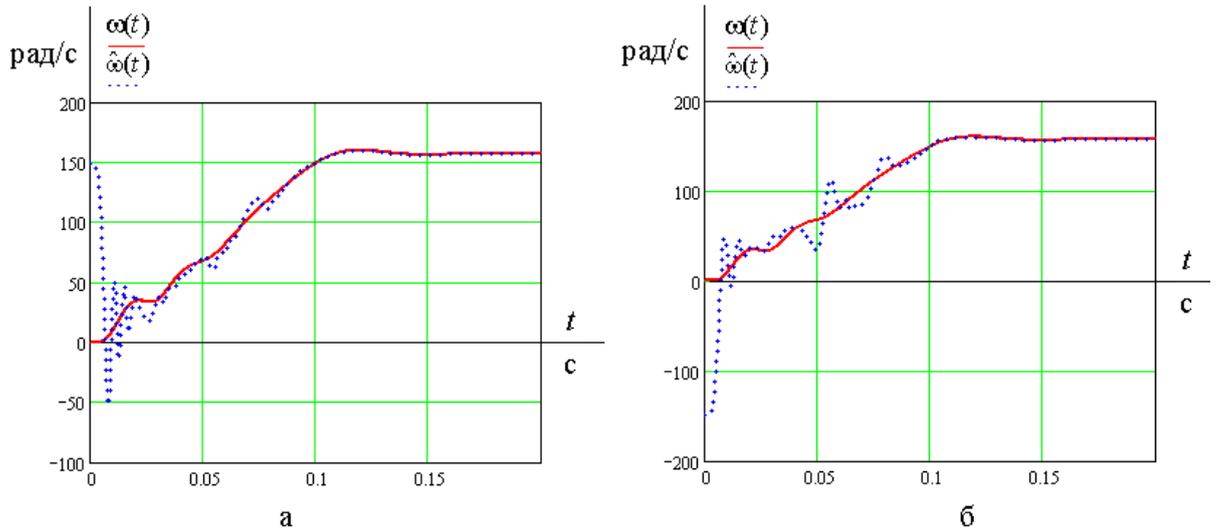


Рисунок 2.8. Переходные процессы угловой частоты вращения АД и ее оценки разработанным наблюдателем:

а – при $\omega(0) = 0$; $\hat{\omega}(0) = \omega_H$; б – при $\omega(0) = 0$; $\hat{\omega}(0) = -\omega_H$

Результаты моделирования подтверждают сходимость оценивания угловой частоты вращения двигателя при неверных начальных условиях разработанного наблюдателя.

На рисунке 2.9 представлены переходные процессы потокосцепления ротора и электромагнитного момента двигателя и их оценки наблюдателем. Из графиков, видно, что разработанный наблюдатель обеспечивает точную оценку указанных переменных электродвигателя.

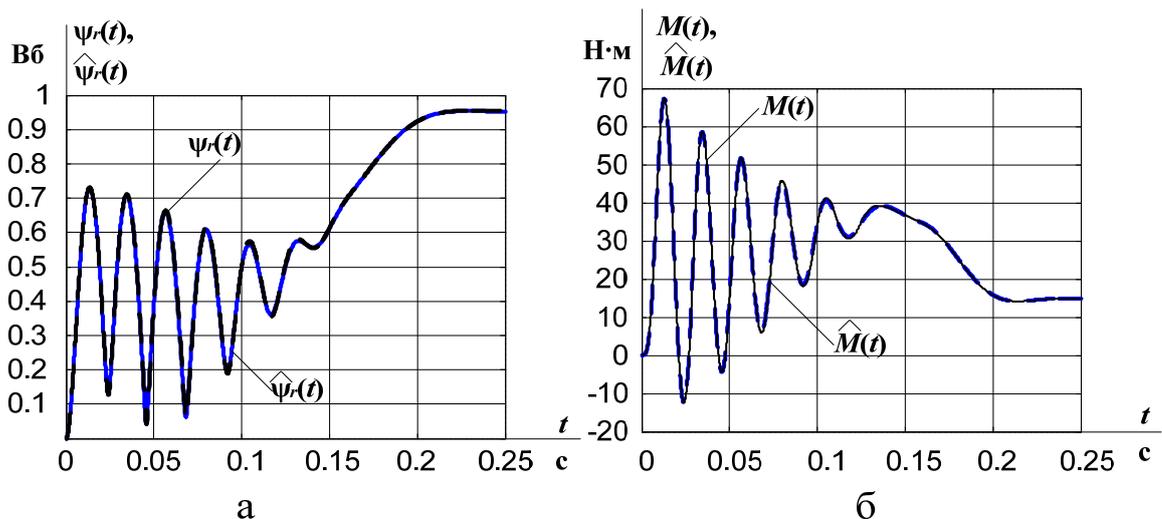


Рисунок 2.9. Переходные процессы в асинхронном электродвигателе и их оценки разработанным наблюдателем: а – потокосцепление ротора;

б – электромагнитный момент на валу АД

На рисунке 2.10, а приведен график оценки момента сопротивления на валу двигателя при ступенчатом набросе нагрузки после пуска АД вхолостую.

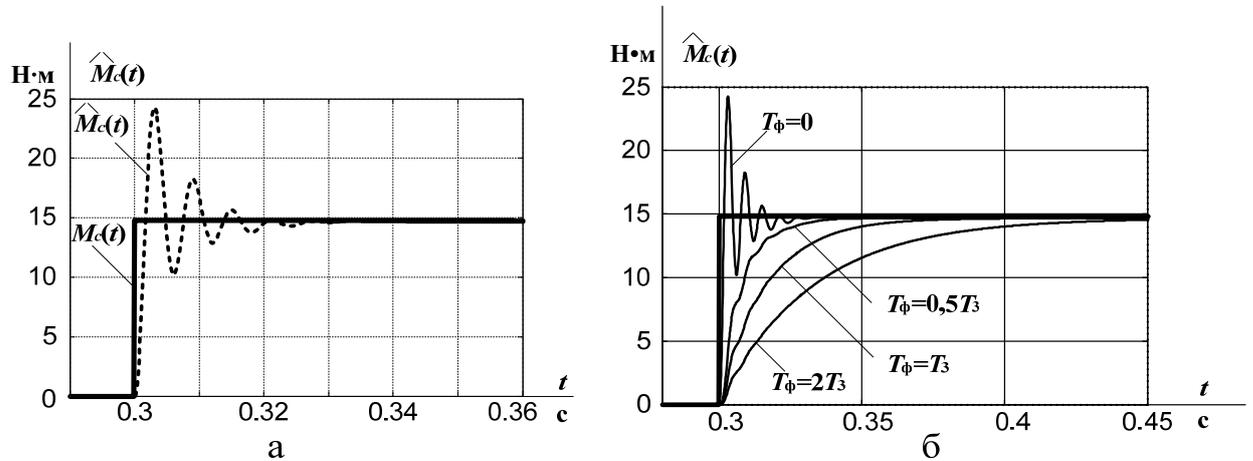


Рисунок 2.10. Переходные процессы оценки момента сопротивления при набросе номинальной нагрузки: а – без фильтрации; б – при различных постоянных времени фильтра

Рисунок 2.10, а свидетельствует о том, что сигнал оценки момента сопротивления имеет колебательный характер. Для устранения колебаний применим апериодический фильтр первого порядка с передаточной функцией вида:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi} \cdot p + 1},$$

где T_{ϕ} – постоянная времени фильтра.

На рисунке 2.10, б представлены переходные процессы оценки момента сопротивления при ступенчатом набросе номинальной нагрузки при различных постоянных времени фильтра.

Для определения количественной меры качества фильтрации оценки момента сопротивления воспользуемся следующим критерием качества:

$$\Delta M_c = \frac{\int_0^t [M_c - \hat{M}_c(t)] \cdot dt}{\int_0^t M_c \cdot dt} \cdot 100 \%$$

Результаты расчета критерия качества при различных значениях постоянной времени фильтра сведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

	$T_{\phi}=0,5T_3$	$T_{\phi}=T_3$	$T_{\phi}=2T_3$
$\Delta M_c, \%$	6,849	12,12	22,658

Исходя из соображений минимума интегрального критерия качества фильтрации оценки момента сопротивления, принимаем для дальнейших исследований постоянную времени фильтра равную $T_{\phi} = 0,5 \cdot T_3$.

В случае фильтрации сигнала оценки момента сопротивления математическая модель наблюдателя дополняется еще одним дифференциальным уравнением:

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

В результате моделирования доказана работоспособность наблюдателя состояния АД, позволяющего оценивать не только полный вектор состояния двигателя, но и момент нагрузки, прикладываемый к валу.

2.4. Имитационное моделирование работы асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем

Для проверки работоспособности в программной среде MATLAB Simulink была создана имитационная модель бездатчикового векторного асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем. В качестве АД был принят двигатель типа АИР 90L4, нагрузка имела реактивный характер. На рисунке 2.11 представлены переходные процессы в бездатчиковой системе при номинальных внутренних параметрах АД в режимах пуска вхолостую при нагрузке $M_c=0,15M_H$ на максимальную

скорость (I), наброса (II) и сброса (III) номинальной нагрузки, реверса (IV) и останова (V).

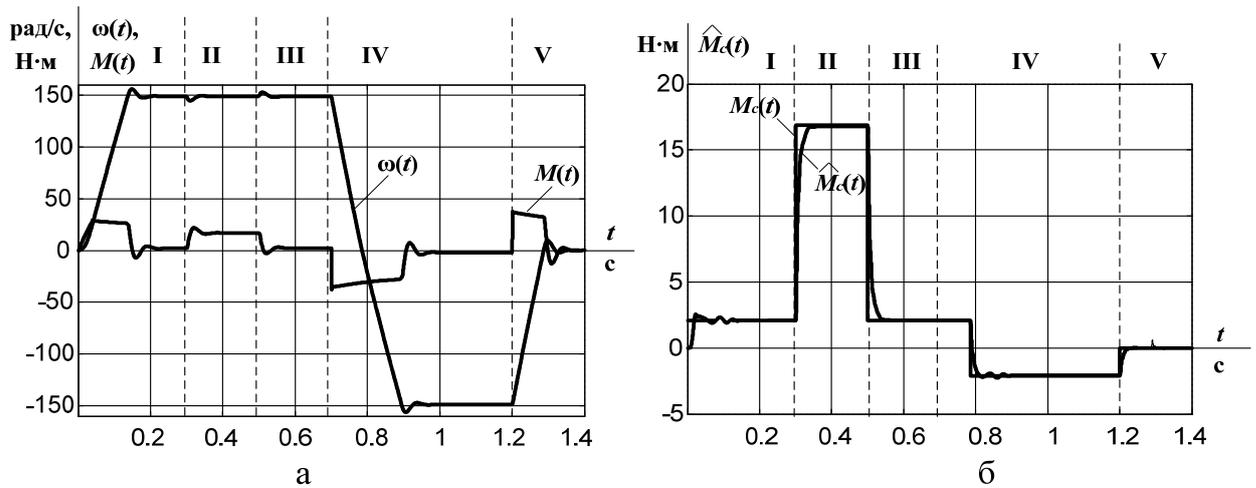


Рис. 2.11. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе при номинальных внутренних параметрах АД:

а – угловая частота вращения и электромагнитный момент;

б – момент сопротивления на валу и его оценка

Из графиков рисунка 2.11 видно, что модель асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем обеспечивает адекватную устойчивую работу во всех динамических режимах при номинальных внутренних параметрах двигателя. При этом наблюдатель позволяет точно оценить момент сопротивления на валу АД, учитывая меняющийся при реверсе знак реактивной нагрузки.

Имитационная модель асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем состояния в программной среде MATLAB Simulink представлена в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Для подтверждения оптимальности подобранных коэффициентов усиления разработанного наблюдателя приведем графики переходных процессов в системах бездатчиковых векторных электроприводов с различной мощностью и числом пар полюсов двигателей (рисунки 2.12 – 2.21).

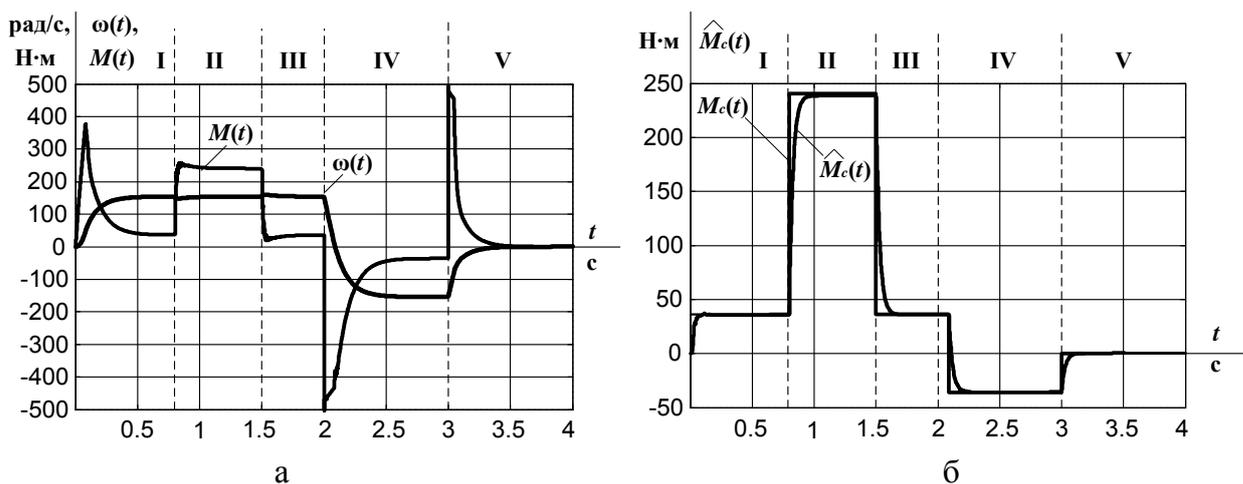


Рисунок 2.12. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР200М4 ($P_{2H}=37$ кВт)

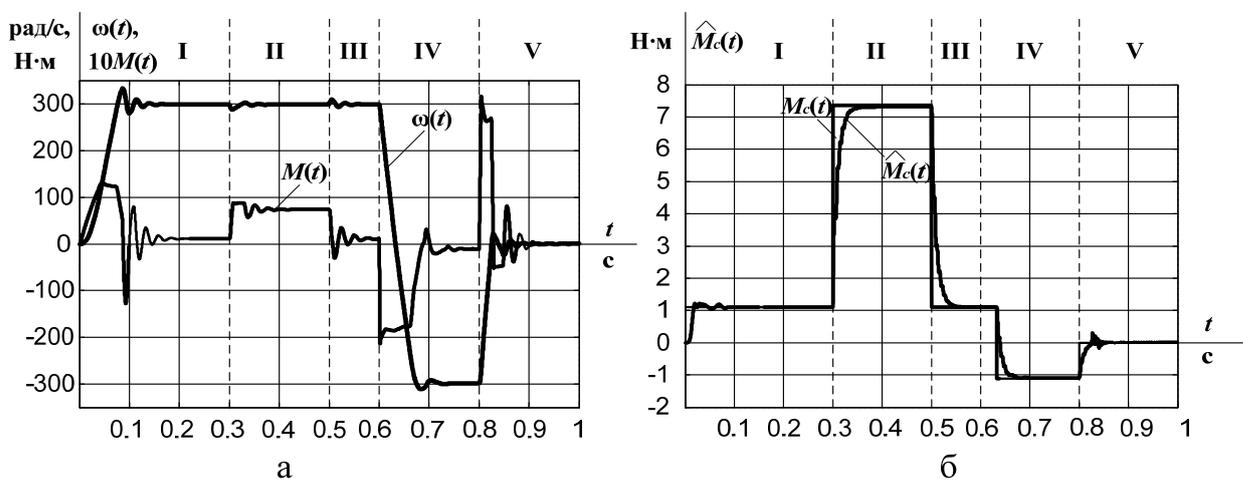


Рисунок 2.13. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР80В2 ($P_{2H}=2,2$ кВт)

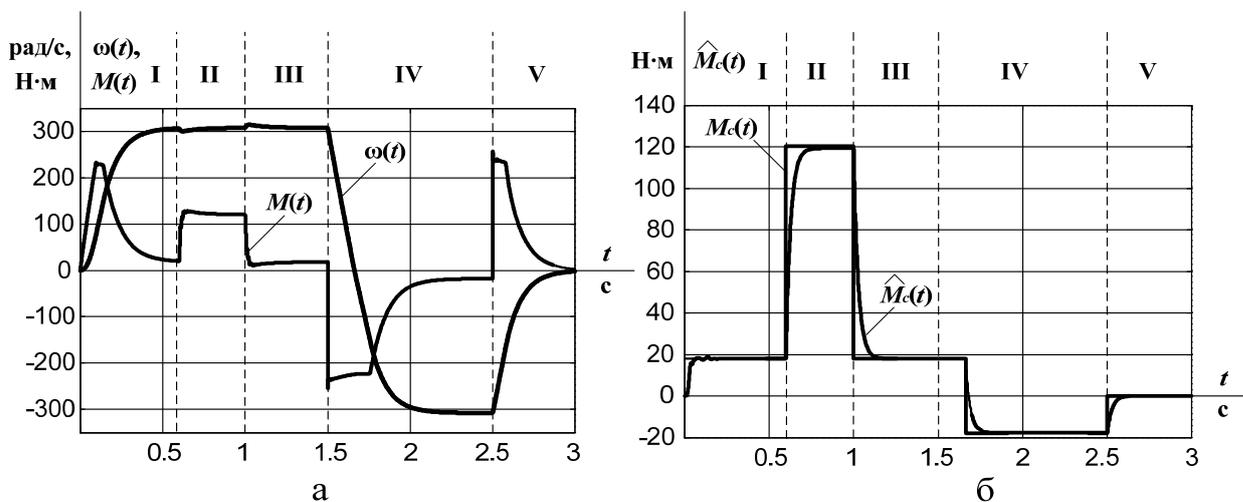


Рисунок 2.14. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР200М2 ($P_{2H}=37$ кВт)

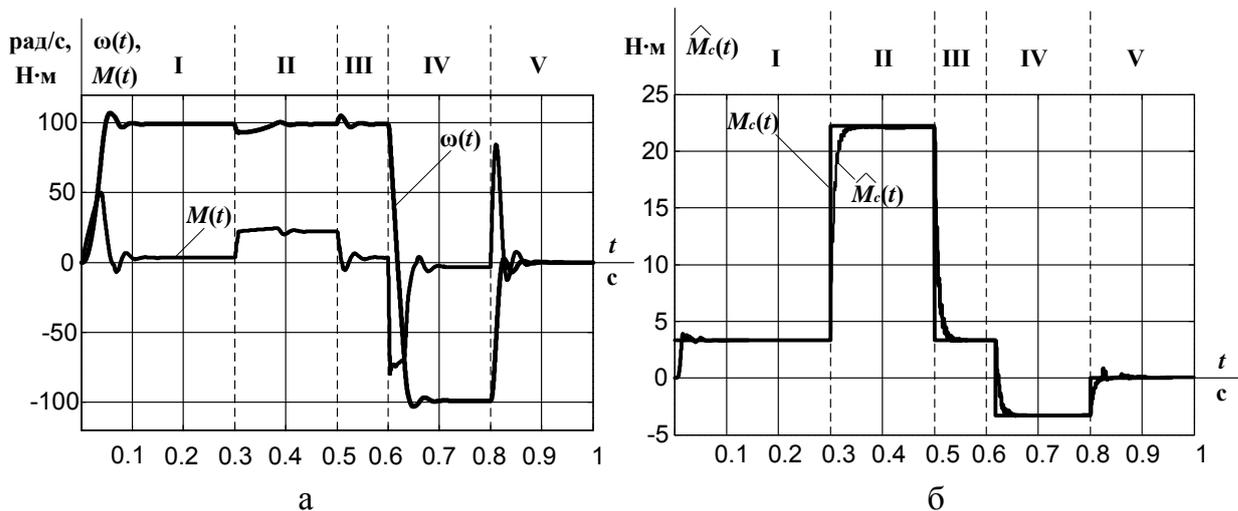


Рисунок 2.15. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР100L6 ($P_{2H}=2,2$ кВт)

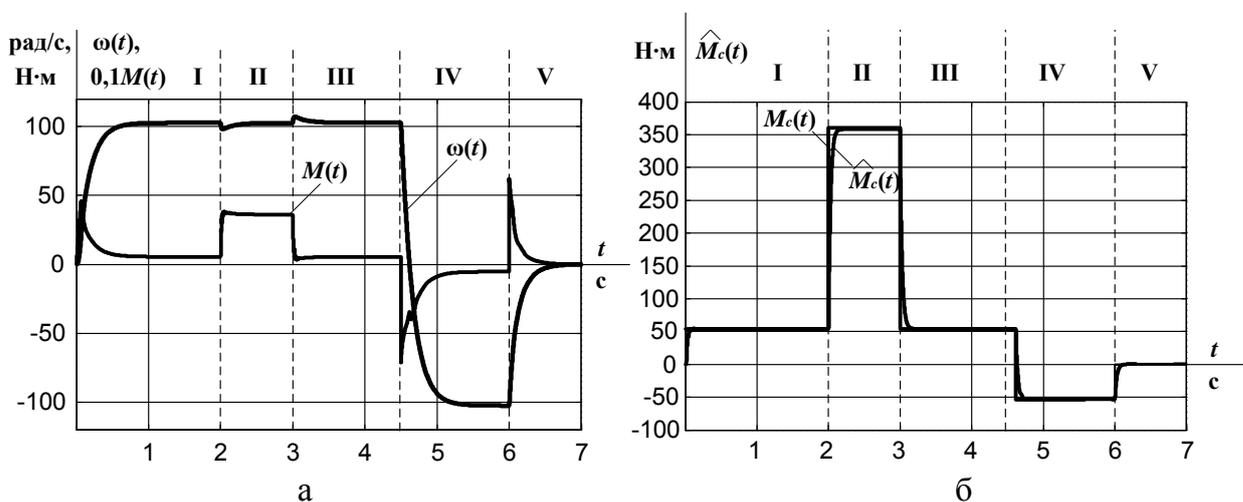


Рисунок 2.16. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР225М6 ($P_{2H}=37$ кВт)

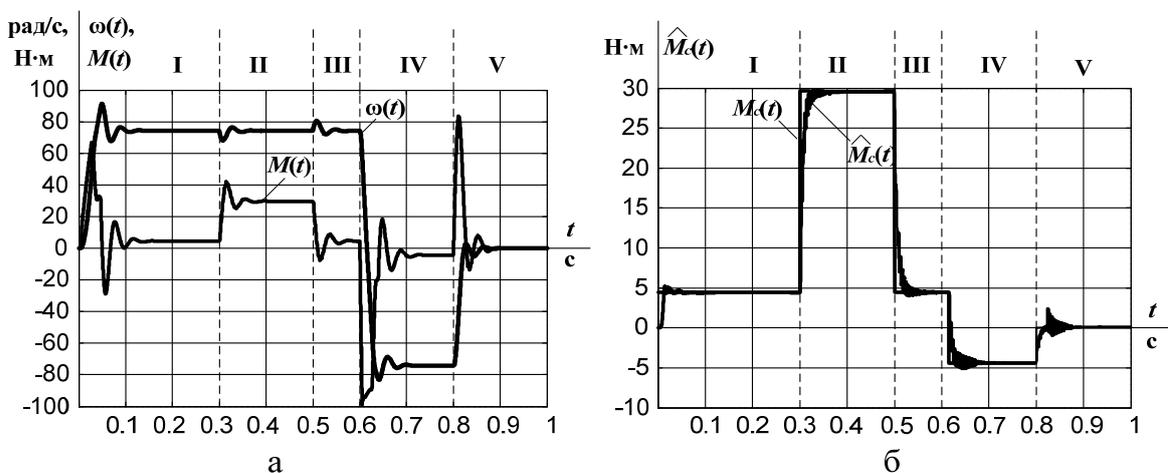


Рисунок 2.17. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР112МА8 ($P_{2H}=2,2$ кВт)

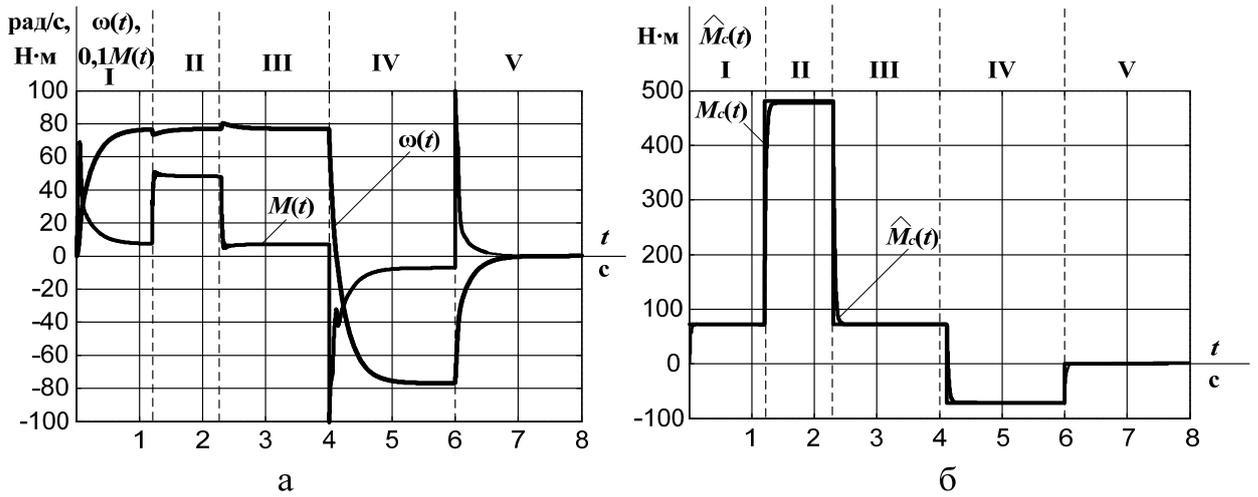


Рисунок 2.18. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР250S8 ($P_{2H}=37$ кВт)

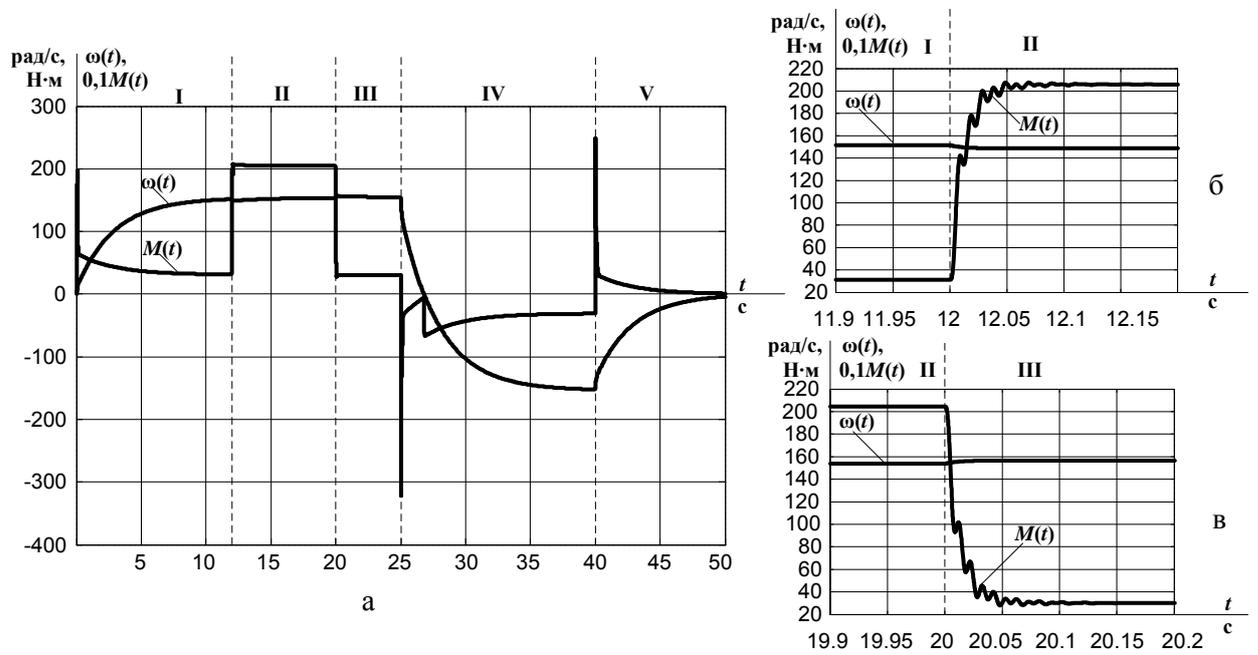


Рисунок 2.19. Переходные процессы в бездатчиковом векторном электроприводе с двигателем типа АИР335M4 ($P_{2H}=315$ кВт): а – полный цикл; б – при набросе нагрузки в увеличении; в – при сбросе нагрузки в увеличении;

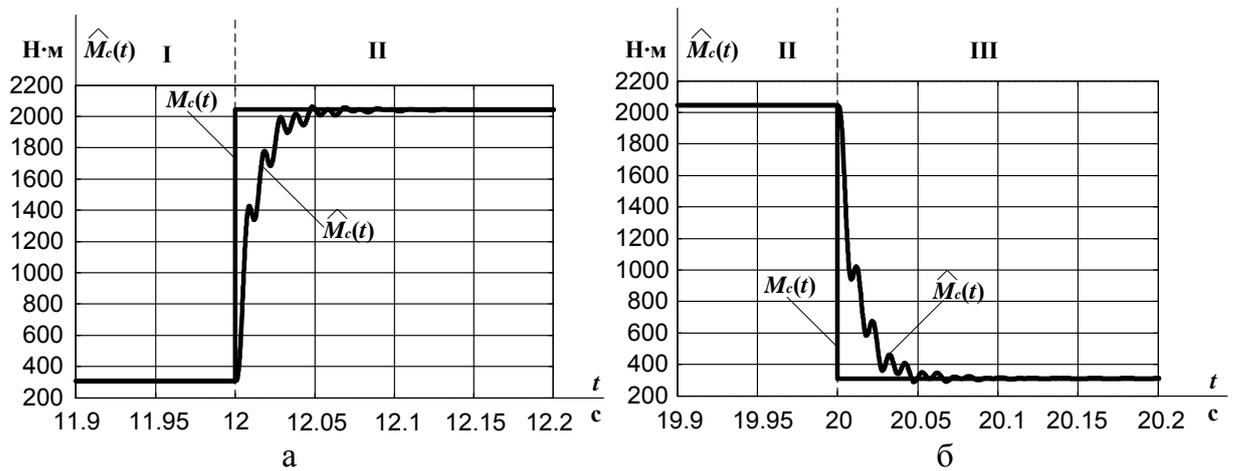


Рисунок 2.20. Переходные процессы оценки момента нагрузки электропривода с двигателем АИР335М4: а – при набросе нагрузки; б – при сбросе нагрузки

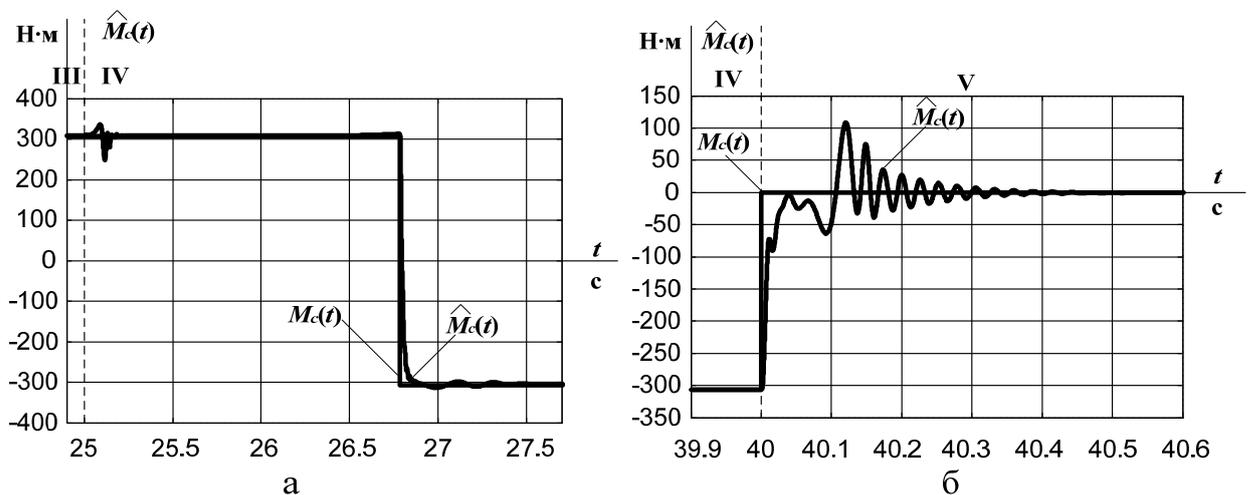


Рисунок 2.21. Переходные процессы оценки момента нагрузки электропривода с двигателем АИР335М4: а – при реверсе электропривода; б – при останове электропривода

Из графиков видно, системы асинхронного электропривода с наблюдателем состояния при различных типах используемых двигателей обеспечивают устойчивую работу с коэффициентами наблюдателя $K_1=K_2=R_e$; $K_3=300$; $T_3=0,1/A_r$, а также оценку момента нагрузки на валу АД при постоянной времени фильтрации сигнала оценки $T_\phi = 0,5 \cdot T_3$.

2.5. Выводы по второй главе

1. Разработана структура наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя, позволяющая оценить полный вектор состояния, электромагнитный и нагрузочный моменты за счет использования адаптивного алгоритма в виде пропорционально-интегральной обработки векторного произведения векторов оценки потокосцепления ротора и невязки статорного тока двигателя в качестве оценки момента сопротивления двигателя.

2. Установлено, что предложенная методика настройки параметров наблюдателя позволяет обеспечить его работоспособность в статических и динамических режимах.

3. Моделирование типовых режимов работы асинхронного электропривода с полеориентированным управлением подтвердило работоспособность предложенного наблюдателя при оценивании ортогональных векторов потокосцепления ротора, угловой скорости вращения и момента сопротивления.

ГЛАВА 3. ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

3.1. Введение понятия интегрального критерия параметрической робастности асинхронного электропривода с наблюдателем состояния

Известно, что на работу электропривода с наблюдателем существенное влияние оказывает изменение внутренних параметров электродвигателя в процессе работы [83–85]. В существующих работах [33, 39, 46, 54 и др.] предлагается оценивать влияние параметрических возмущений на показатели качества АЭП по картинам переходных процессов при моделировании и экспериментальных исследованиях, однако не существует подхода к количественной оценке влияния параметрических возмущений на работу электропривода с наблюдателем. Поэтому актуальной задачей является разработка критерия, позволяющего численно оценить качество работы АЭП с наблюдателем состояния в условиях параметрических возмущений.

Из теории автоматического управления известно широкое применение интегральных методов для оценки качества процессов в динамических системах [69, 86]. Подобные методы основываются на численном или аналитическом интегрировании функций, описывающих процессы в исследуемых объектах. Для сходимости интеграла функционал представляют в виде отклонения переходной характеристики от установившегося значения. Так как переходные процессы зачастую имеют колебательный характер, целесообразнее использовать модуль или квадрат от вышеуказанного отклонения, чтобы исключить влияние знакопеременности подынтегрального функционала на результаты расчета.

Учитывая вышеуказанные факты, для количественной оценки степени параметрической робастности на этапе разработки асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния предложено использовать

следующий интегральный критерий качества, основанный на интегрировании мгновенных значений выходных переменных электропривода:

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

Здесь $\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t)$ – 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.

Пределы интегрирования $t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}$ представляют собой продолжительность исследуемого процесса в АЭП. Наибольшее влияние изменения внутренних параметров проявляется в переходных режимах работы электропривода, к которым относятся пуск, реверс, останов, набросы и сбросы нагрузки.

Предложенный критерий позволит получить количественную оценку степени отклонения выходной координаты электропривода с наблюдателем состояния от выхода АЭП без наблюдателя при изменении внутренних параметров $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ в первой из указанных электромеханических систем, принимая вторую за эталонную.

3.2. Исследование параметрической робастности асинхронного электропривода с помощью предложенного интегрального критерия

С целью выявления эффекта повышенной параметрической робастности асинхронного электропривода с разработанным наблюдателем состояния были проведены сравнительные исследования с использованием

разработанного наблюдателя и наилучшими из известных аналогов – расширенного фильтра Калмана и наблюдателя полного порядка.

В работах [39, 46] путем имитационного моделирования доказано, что наибольшее влияние на работу асинхронного электропривода с наблюдателем состояния в цепи обратной связи оказывает изменение активных сопротивлений обмоток статора и ротора АД. Вариации индуктивностей в больших пределах не вносят существенных изменений в качественную картину выходных переменных АЭП, а увеличение эквивалентного момента инерции электропривода приводит исключительно к затягиванию длительности переходных процессов. Учитывая эти результаты, интегральный критерий параметрической робастности рассчитывался исключительно при изменении активных сопротивлений обмоток двигателя.

Схема алгоритма исследования параметрической робастности электроприводов с разработанным наблюдателем состояния, а также известными аналогами представлена на рисунке 3.1.

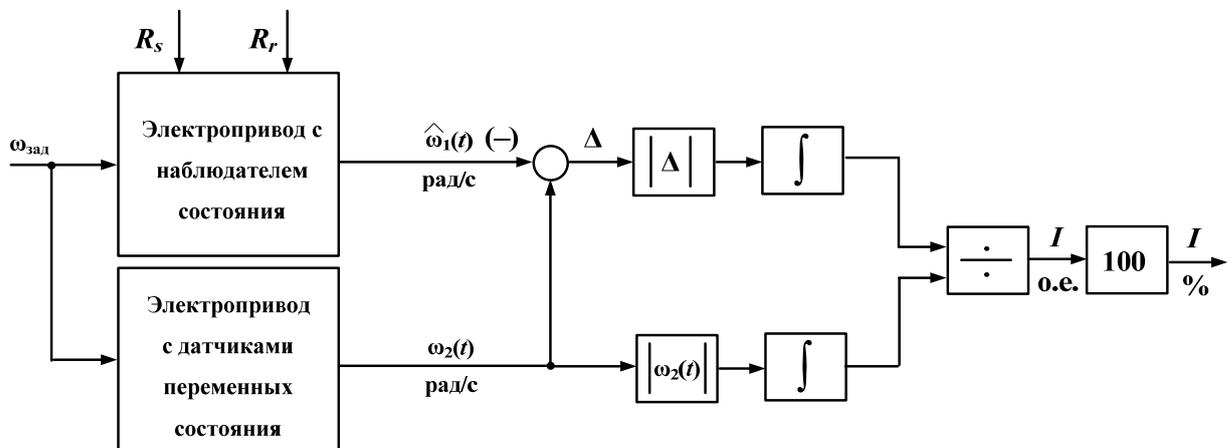


Рисунок 3.1. Схема алгоритма исследования параметрической робастности

Программа исследования степени параметрической робастности электропривода с наблюдателем состояния заключалась в сравнении выходных координат двух асинхронных электроприводов в режиме пуска под номинальной нагрузкой. В качестве исследуемого АД использовался двигатель типа АИР 90L4. Асинхронный электропривод с векторным

управлением использовал в одном случае в качестве обратных связей выходные сигналы датчиков угловой частоты вращения и потокосцепления ротора, а во втором случае оценки, полученные с наблюдателя состояния. При этом производилось варьирование активных сопротивлений обмоток двигателя в системе с наблюдателем состояния в пределах $\pm 20\%$ от базовых величин, за которые были приняты расчетные номинальные значения сопротивлений АД.

Результаты численного моделирования в среде MATLAB Simulink интегрального критерия параметрической робастности для электроприводов с различными наблюдателями состояния представлены в таблицах 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1 – Значения интегрального критерия степени параметрической робастности электропривода с наблюдателем полного порядка

0,8Rs	0,85Rs	0,9Rs	0,95Rs	Rs	1,05Rs	1,1Rs	1,15Rs	1,2Rs	
12,963	9,961	6,479	4,528	3,229	1,793	1,806	3,299	5,063	1,2Rr
12,993	9,824	6,555	3,92	2,582	1,155	1,98	3,605	5,486	1,15Rr
13,249	9,536	6,452	3,355	1,952	0,699	2,252	4,015	6,007	1,1Rr
13,692	9,221	6,284	2,864	1,238	0,889	2,609	4,568	6,658	1,05Rr
14,051	8,933	5,908	2,796	0,496	1,228	3,156	5,15	7,379	Rr
14,243	9,104	5,463	2,597	0,387	2,068	4,005	6,135	8,45	0,95Rr
13,112	9,278	4,979	2,364	1,234	3,025	5	7,236	9,618	0,9Rr
12,48	9,12	4,456	2,002	2,128	4,007	6,091	8,387	10,953	0,85Rr
13,211	8,438	3,998	2,139	3,088	5,082	7,221	9,656	12,373	0,8Rr

Таблица 3.2 – Значения интегрального критерия степени параметрической робастности электропривода с расширенным фильтром Калмана

0,8Rs	0,85Rs	0,9Rs	0,95Rs	Rs	1,05Rs	1,1Rs	1,15Rs	1,2Rs	
5,591	7,36	10,799	13,016	13,535	12,694	11,102	10,163	9,253	1,2Rr
16,667	4,051	5,114	8,978	11,284	12,228	11,579	10,371	9,32	1,15Rr
16,098	15,6	1,676	2,609	6,858	9,694	10,833	10,337	9,373	1,1Rr
15,161	14,755	14,428	3,906	0,932	5,421	8,415	9,547	9,135	1,05Rr
13,436	13,825	13,52	13,291	1,469	3,681	3,492	7,028	8,244	Rr
11,016	12,003	12,606	12,165	12,079	8,343	6,192	2,149	5,406	0,95Rr
7,925	9,345	10,637	11,182	10,625	10,679	8,356	7,885	1,878	0,9Rr
5,236	6,446	7,87	9,364	9,532	9,041	9,436	7,597	9,507	0,85Rr
2,649	3,402	4,931	6,666	7,658	8,003	7,7	8,198	6,45	0,8Rr

Таблица 3.3 – Значения интегрального критерия степени параметрической робастности электропривода с разработанным наблюдателем

0,8Rs	0,85Rs	0,9Rs	0,95Rs	Rs	1,05Rs	1,1Rs	1,15Rs	1,2Rs	
7,58	6,211	4,71	3,082	10,423	2,492	4,408	6,732	9,671	1,2Rr
7,337	5,95	4,421	2,748	7,606	2,448	4,465	6,673	9,223	1,15Rr
7,061	5,668	4,116	2,399	5,005	2,418	4,565	6,919	9,45	1,1Rr
6,753	5,355	3,784	2,039	2,578	2,446	4,746	7,234	9,896	1,05Rr
2,496	1,848	1,284	0,777	0,345	0,411	0,6	0,968	1,353	Rr
6,461	5,072	3,477	1,664	1,676	3,015	5,5	8,202	11,137	0,95Rr
6,406	5,055	3,486	1,747	3,477	3,561	6,103	8,91	11,988	0,9Rr
6,303	5,002	3,483	1,8	5,089	4,158	6,761	9,669	12,913	0,85Rr
6,106	4,914	3,467	1,831	6,503	4,839	7,48	10,49	13,919	0,8Rr

На рисунках 3.2 – 3.4 приведены трехмерные зависимости интегрального критерия робастности от изменения активных сопротивлений обмоток двигателя асинхронного электропривода.

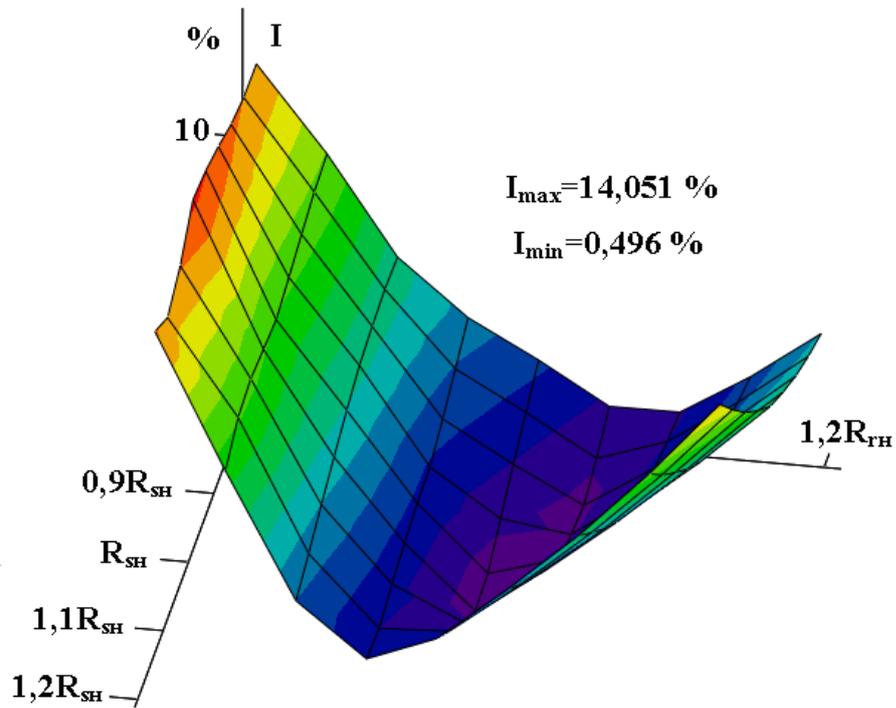


Рисунок 3.2. Трехмерный график зависимости интегрального критерия параметрической робастности электропривода с наблюдателем полного порядка от активных сопротивлений обмоток АД

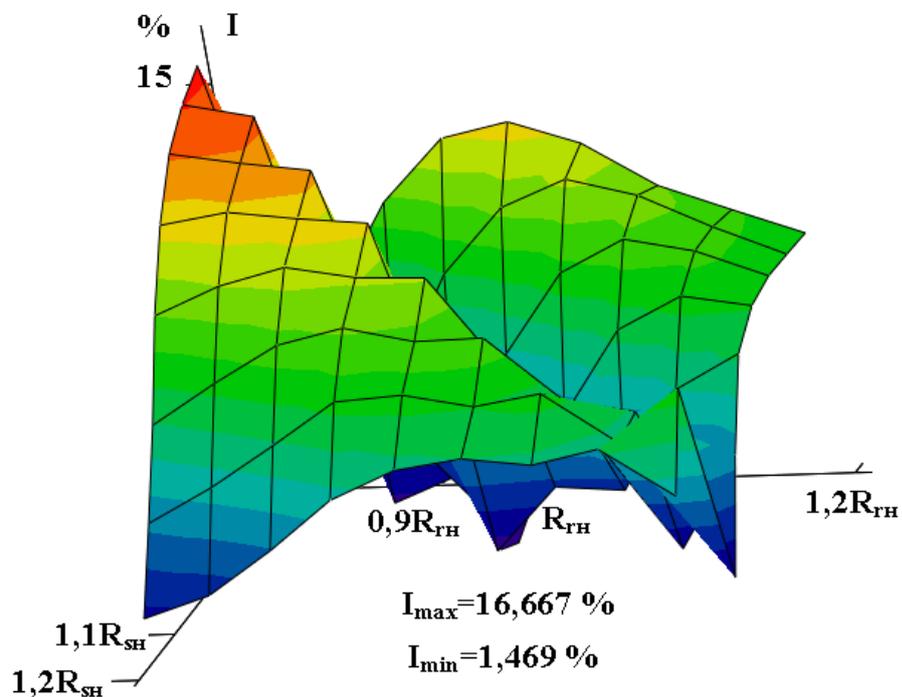


Рисунок 3.3. Трехмерный график зависимости интегрального критерия параметрической робастности электропривода с расширенным фильтром Калмана от активных сопротивлений обмоток АД

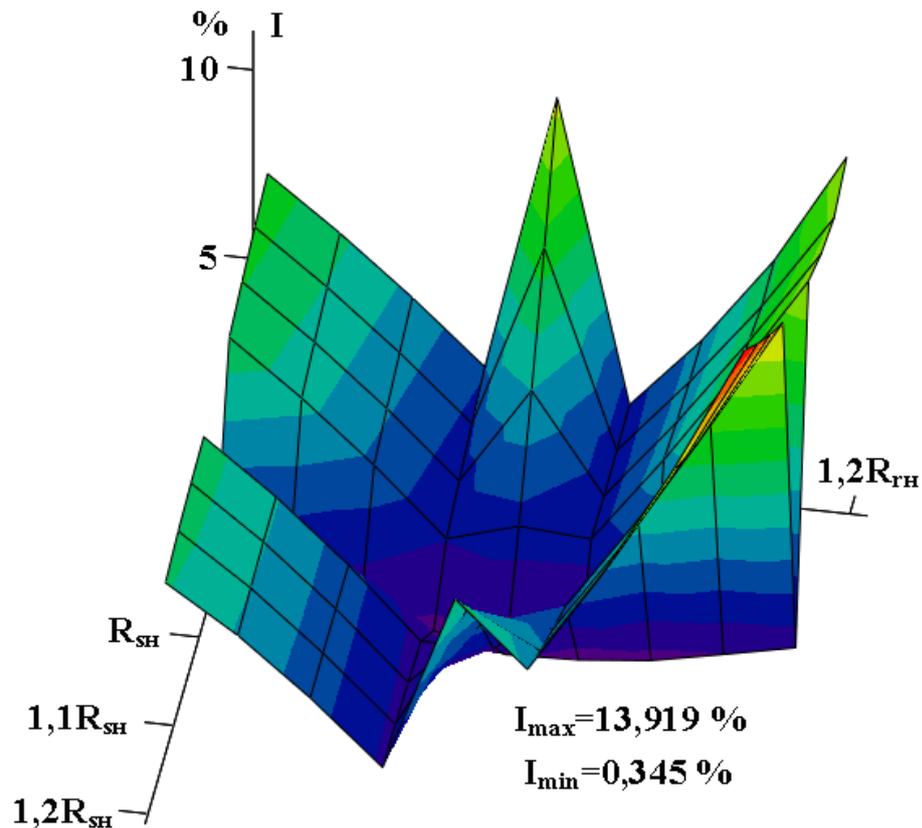


Рисунок 3.4. Трехмерный график зависимости интегрального критерия параметрической робастности электропривода с разработанным наблюдателем от активных сопротивлений обмоток АД

Результаты численного моделирования показали, 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. Этот факт позволяет утверждать, что предложенный интегральный критерий параметрической робастности может служить квалитетическим инструментом комплексной оценки качества работы АЭП с наблюдателем состояния в условиях параметрических возмущений.

3.3. Исследование изменения статической ошибки асинхронного электропривода при вариации граничных отклонений активных сопротивлений обмоток электродвигателя

Интерес представляет исследование процессов в АЭП с наблюдателем состояния при предельных отклонениях активных сопротивлений обмоток двигателя. В качестве граничных выбраны значения сопротивлений в диапазоне $\pm 20\%$ от расчетных номинальных.

Для оценки изменения выходных координат электропривода с наблюдателем состояния были сняты графики переходных процессов при предельных значениях диапазона изменения активных сопротивлений обмоток АД (рисунки 3.5 – 3.10).

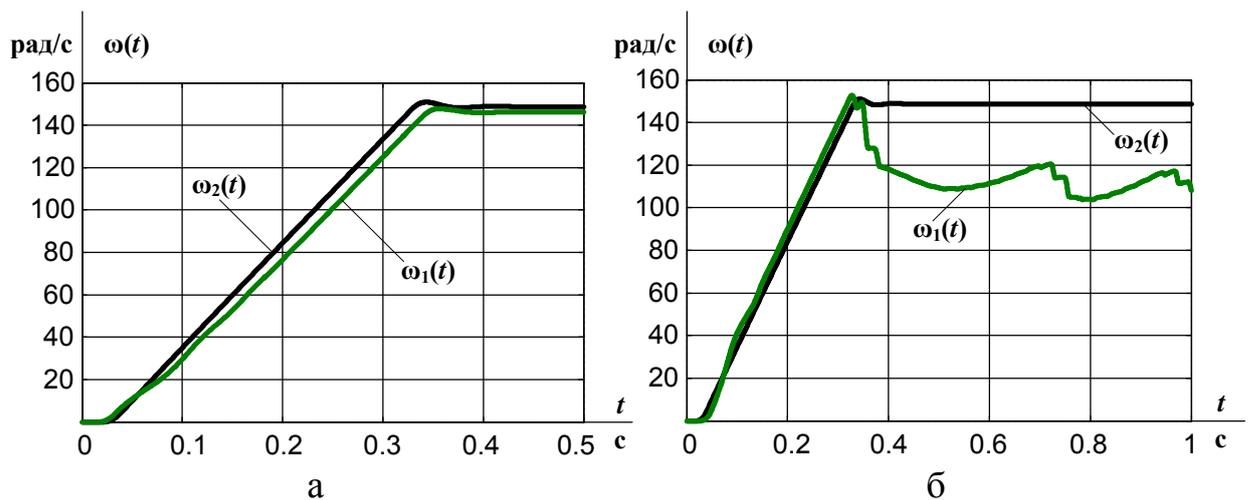


Рисунок 3.5. Переходные процессы угловой частоты вращения электропривода с наблюдателем полного порядка:

а – при $R_s=1,2R_{SH}$ и $R_r=1,2R_{rH}$; б – при $R_s=0,8R_{SH}$ и $R_r=0,8R_{rH}$

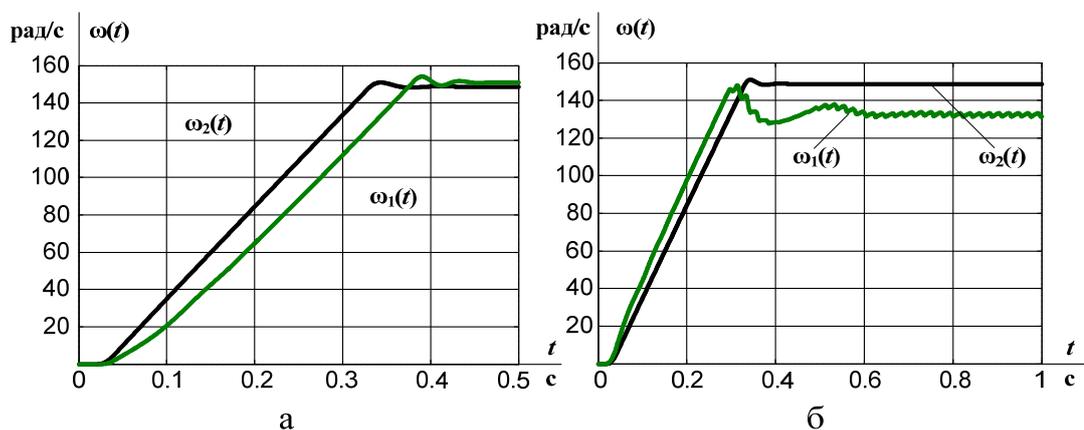


Рисунок 3.6. Переходные процессы угловой частоты вращения электропривода с наблюдателем полного порядка:

а – при $R_s=1,2R_{SH}$ и $R_r=0,8R_{TH}$; б – при $R_s=0,8R_{SH}$ и $R_r=1,2R_{TH}$

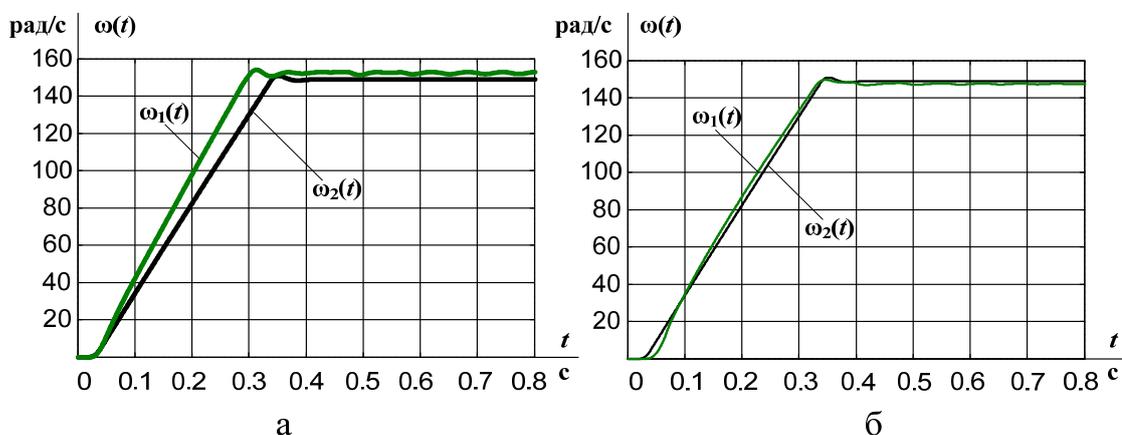


Рисунок 3.7. Переходные процессы угловой частоты вращения электропривода с расширенным фильтром Калмана:

а – при $R_s=1,2R_{SH}$ и $R_r=1,2R_{TH}$; б – при $R_s=0,8R_{SH}$ и $R_r=0,8R_{TH}$

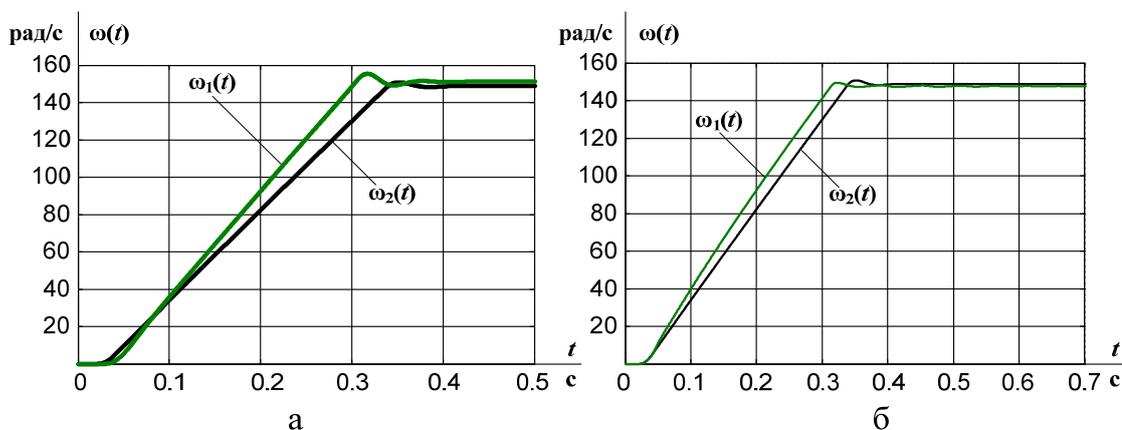


Рисунок 3.8. Переходные процессы угловой частоты вращения электропривода с расширенным фильтром Калмана:

а – при $R_s=1,2R_{SH}$ и $R_r=0,8R_{TH}$; б – при $R_s=0,8R_{SH}$ и $R_r=1,2R_{TH}$

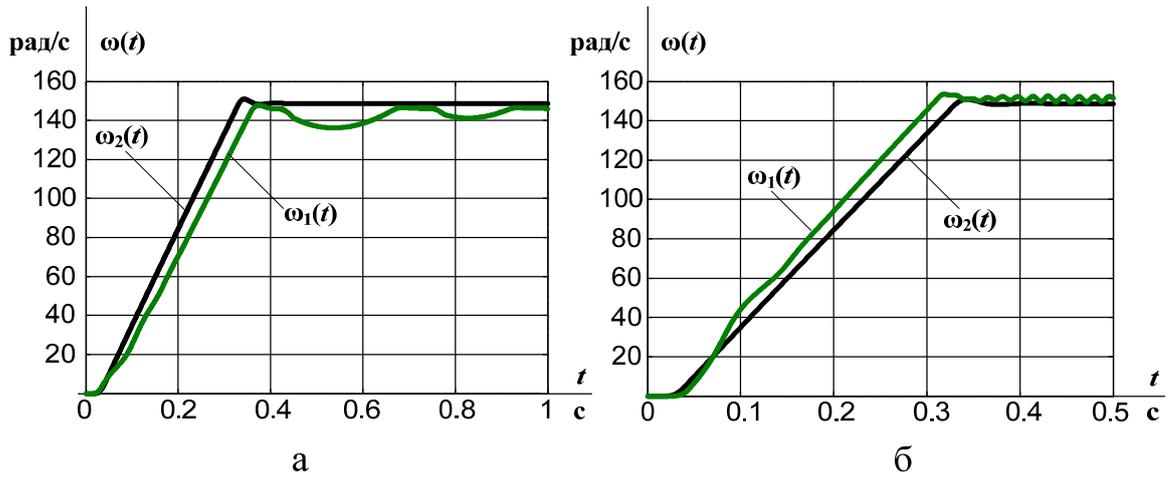


Рисунок 3.9. Переходные процессы угловой частоты вращения электропривода с предлагаемым наблюдателем:

а – при $R_s=1,2R_{SH}$ и $R_r=1,2R_{rH}$; б – при $R_s=0,8R_{SH}$ и $R_r=0,8R_{rH}$

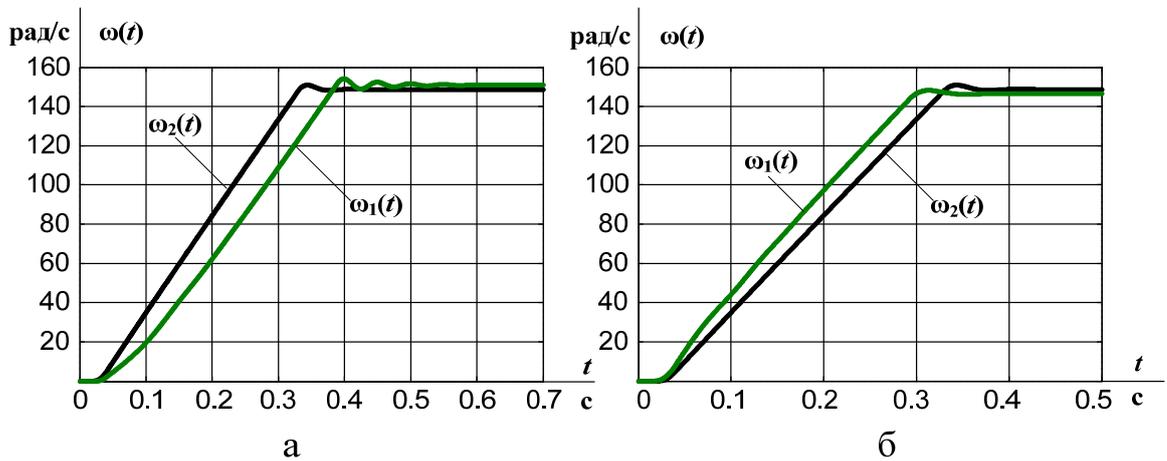


Рисунок 3.10. Переходные процессы угловой частоты вращения электропривода с предлагаемым наблюдателем:

а – при $R_s=1,2R_{SH}$ и $R_r=0,8R_{rH}$; б – при $R_s=0,8R_{SH}$ и $R_r=1,2R_{rH}$

Из полученных графиков можно сделать вывод о том, что при изменении активных сопротивлений обмоток двигателя электропривода в установившемся режиме возникает статическая ошибка – отклонение угловой частоты вращения от заданного значения (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Статическая ошибка асинхронного электропривода, %

	$R_s=1,2R_{SH};$ $R_r=1,2R_{rH}$	$R_s=0,8R_{SH};$ $R_r=0,8R_{rH}$	$R_s=1,2R_{SH};$ $R_r=0,8R_{rH}$	$R_s=0,8R_{SH};$ $R_r=1,2R_{rH}$
Наблюдатель полного порядка	1,7	неустойчив	1,5	10,9
Расширенный фильтр Калмана	2,3	0,01	1,7	0,007
Разработанный наблюдатель	1,7	1,9	1,5	1,5

Анализируя данные таблицы 3.4, можно отметить, что в случае увеличения активных сопротивлений разработанный наблюдатель имеет приемлемую статическую ошибку, не превышающую значений, характерных для рассматриваемых аналогов.

3.4. Выводы по третьей главе

1. Предложен квалиметрический подход в форме интегрального критерия для оценки степени чувствительности к изменению внутренних параметров асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния при исследовании параметрической робастности.
2. Проведенные с применением предложенного интегрального критерия параметрической робастности исследования доказали, что разработанный наблюдатель состояния имеет определенное преимущество по сравнению с известными аналогами в условиях флуктуации активных сопротивлений обмоток двигателя при использовании в составе асинхронных электроприводов.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ

Целью данной главы являлось проведение экспериментальных комплексных исследований работоспособности и степени параметрической робастности разработанного наблюдателя состояния АД в условиях несимметричности и несинусоидальности входных сигналов – статорных токов и напряжений реальных двигателей различной мощности.

Для достижения поставленной цели путем проведения серии экспериментов последовательно были решены следующие задачи:

- подтверждение работоспособности наблюдателя при питании АД непосредственно от промышленной сети переменного тока с несимметричностью и несинусоидальностью фазных напряжений;

- апробация возможности оценивания электромагнитного момента и угловой скорости вращения АД с помощью разработанного наблюдателя при питании двигателя от преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения;

- исследование параметрической робастности наблюдателя в режиме реального времени.

4.1. Идентификация скорости вращения вала асинхронного двигателя при питании от промышленной сети переменного тока с несимметричностью и несинусоидальностью фазных напряжений

Для проверки работоспособности разработанного наблюдателя в условиях несимметричности и несинусоидальности статорных напряжений и токов двигателя в лаборатории «Теории электропривода и автоматического управления» Национального исследовательского Томского политехнического университета использовался лабораторный стенд, внешний вид которого представлен на рисунке 4.1.

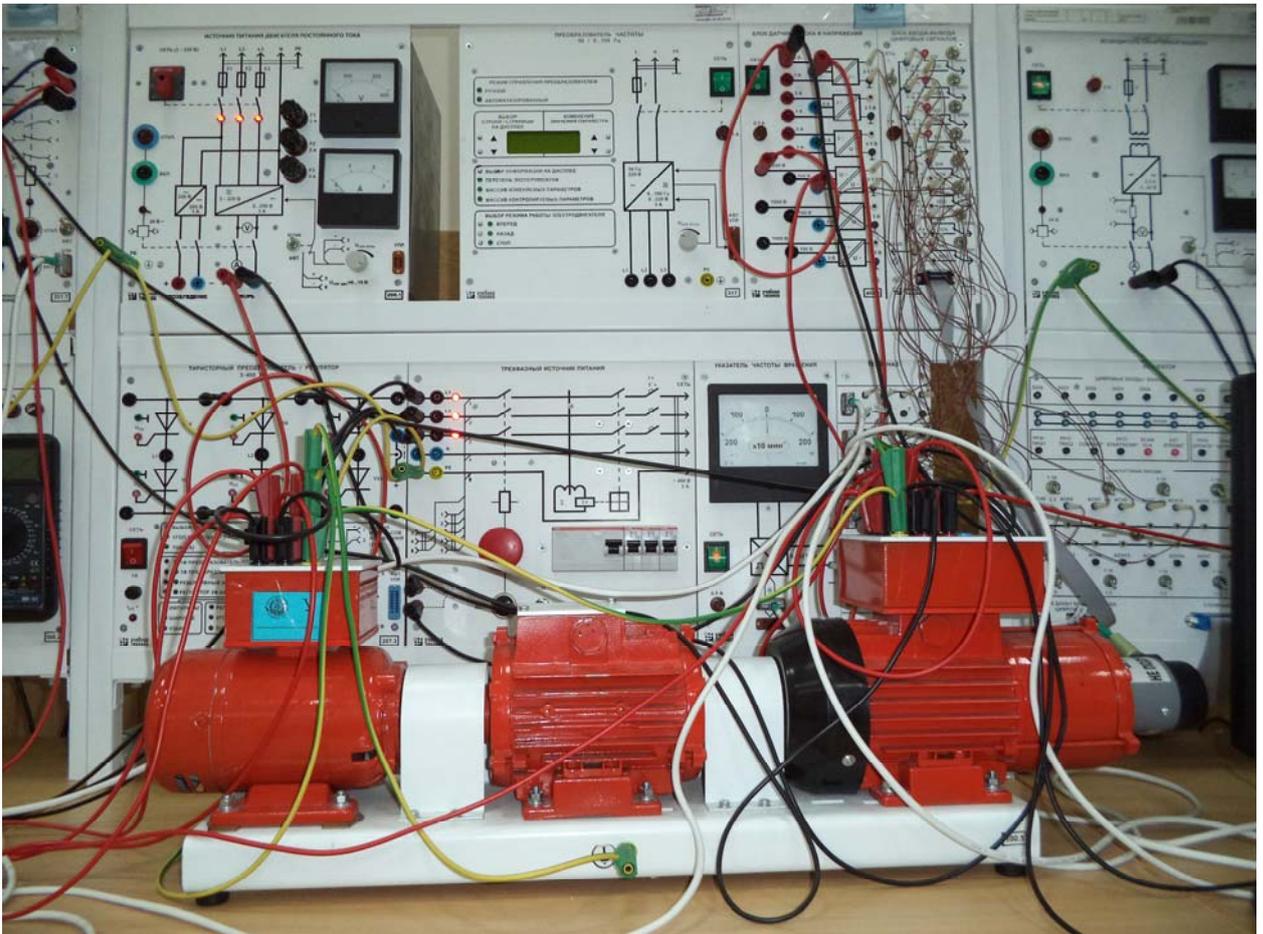


Рисунок 4.1. Внешний вид экспериментального стенда для проверки работоспособности разработанного наблюдателя при питании АД от трехфазной сети переменного тока

В состав установки входят электромашинный агрегат, источники питания для электрических машин постоянного и переменного тока, блоки реостатов, датчиков тока и напряжения, мультиметров, указатель частоты вращения электрических машин, коннектор, персональный компьютер с платой сбора данных PCI-6024E фирмы National Instruments.

Электромашинный агрегат состоит из машины переменного тока, маховика, машины постоянного тока, выступающей в ходе эксперимента в качестве нагрузочной, а также преобразователя угловых перемещений типа ВЕ 178А.

Параметры электромашинного агрегата представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Машина постоянного тока	
Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1500
Возбуждение	Независимое/ параллельное/ последовательное
Номинальное напряжение возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
КПД, %	57,2
Направление вращения	любое
Режим работы	двигательный/ генераторный
Машина переменного тока	
Число фаз на статоре	3
Число фаз на роторе	3
Как асинхронная машина	
Частота тока, Гц	50
Номинальная полезная активная мощность, Вт	30
Номинальное напряжение, В	127
Схема соединения обмотки статора	Y
Схема соединения обмотки ротора	Y
Номинальный ток статора, А	0,35
КПД, %	36
cos φ _н	0,73
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1350
Маховик	
Момент инерции, н·м·с ²	0,032
Масса, кг, не более	7
Преобразователь угловых перемещений	
Модель	BE 178A
Количество выходных каналов	6
Выходные сигналы	серия импульсов и опорный импульс
Число импульсов за оборот в серии	2500
Диапазон изменения рабочих частот вращения вала, мин ⁻¹	0..6000

Трехфазный источник питания предназначается для питания трехфазным переменным напряжением. Источник включается вручную, имеет устройство защитного отключения, защиту от перегрузок, ключ от несанкционированного включения и кнопку аварийного отключения.

Трехфазный источник питания имеет следующие параметры:

- напряжение питания $U_n = 400 \text{ В}$;
- номинальный ток $I_n = 16 \text{ А}$;
- ток срабатывания устройства защитного токоограничения 30 мА .

Источник питания машины постоянного тока предназначается для питания обмоток якоря. Включается дистанционно от компьютера или вручную. Якорное напряжение регулируется также. Источник питания машины постоянного тока имеет следующие параметры:

- номинальное напряжение цепи якоря $U_n = 250 \text{ В}$;
- номинальный ток цепи якоря $I_n = 3 \text{ А}$;
- номинальное напряжение цепи возбуждения $U_n = 200 \text{ В}$;
- номинальный ток цепи возбуждения $I_n = 1 \text{ А}$.

Блок реостатов предназначен для ограничения пускового тока в цепи якоря двигателя постоянного тока. Параметры реостата:

- номинальное сопротивление $R_n = 200 \text{ Ом}$;
- номинальный ток $I_n = 0,8 \text{ А}$.

Коннектор предназначен для обеспечения удобного доступа к входам/выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.

Параметры коннектора:

- 8 аналоговых дифференциальных входов;
- 2 аналоговых выхода;
- 8 цифровых входов/выходов.

Блок датчиков тока и напряжения предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически развязанных от силовых цепей. Блок содержит три

измерительных преобразователя «ток-напряжение» (5A/1A)/5В;
 измерительных преобразователя «напряжение-напряжение»
 (1000В/100В)/5В.

Блок мультиметров предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Блок мультиметров является цифровым с жидкокристаллическим дисплеем и имеет следующие параметры:

- номинальное напряжение $U_n = 1000$ В переменного и постоянного тока;
- номинальный ток $I_n = 10$ А, как постоянный, так и переменный;
- номинальное сопротивление $R_n = 20$ МОм.

Указатель частоты вращения предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме $\omega_{ном} = -2000 \dots 0 \dots 2000$ мин⁻¹.

Персональный компьютер предназначен для дистанционного либо автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем, является IBM-совместимым, содержит плату сбора данных PCI-6024E фирмы National Instruments является многофункциональной платой аналогового и цифрового ввода/вывода с таймером для компьютеров с шинами PCI, PXI и CompactPCI. В число поддерживаемых платой функций входят аналоговый ввод/вывод, цифровой ввод/вывод, а также ввод/вывод тактирующих сигналов.

Характеристики аналогового входа платы 6024E сведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики аналогового входа платы 6024E

Количество каналов	16 однопроводных и 8 дифференциальных (режим выбирается программно для каждого канала)
Тип АЦП	последовательная аппроксимация
Разрешение	12 бит, 1 в 4096
Скорость сэмпирования	20000 сэмплов в секунду (гарантировано)
Диапазон входных сигналов	только биполярный
Входная связь	постоянный ток

Макс. рабочее напряжение (сигнал + синфазный режим)	каждый вход должен находиться в пределах 11 В от земли
Передача данных	DMA, прерывания, программируемый ввод/вывод
Режим DMA	сбор вразброс (одна передача, запрос на передачу)
Размер памяти конфигурирования	512 слов
Время стабилизации для полномасштабного шага	5 мс (максимум)

Для визуализации полученных результатов была использована пользовательская программа в среде LabVIEW – приложении для разработки программ, использующем графический язык программирования, называемый G, с помощью которого программа создаётся в виде блок-схемы. В LabVIEW содержатся специальные библиотеки для сбора данных, VXI, GRIB, управления устройствами на последовательных портах, анализа, представления и хранения данных.

Пользовательский интерфейс программы, разработанной в среде LabVIEW для регистрации экспериментальных данных, представлен на рисунке 4.2.

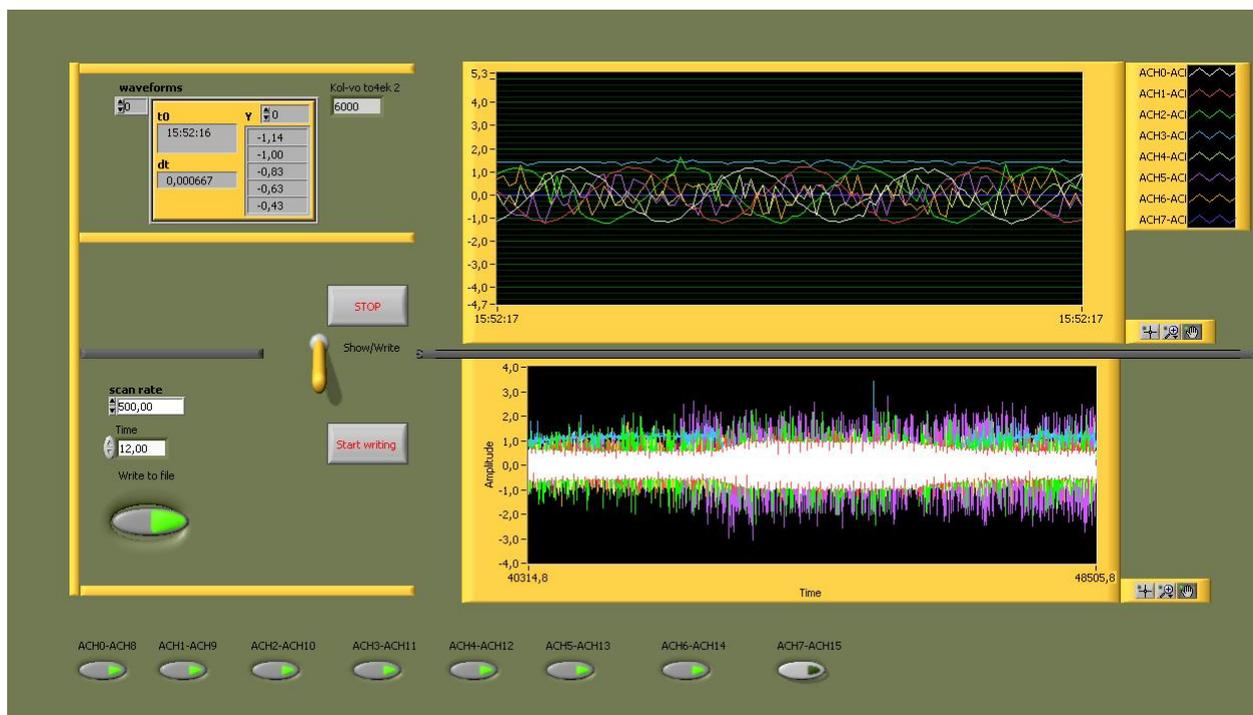


Рисунок 4.2. Пользовательский интерфейс программы в среде LabVIEW

В ходе проведенного эксперимента исследованию подлежали динамические режимы пуска асинхронного двигателя при минимальном моменте сопротивления и дальнейшем набросе нагрузки. В качестве нагрузочной машины использовался двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Сбор данных производился с частотой дискретизации $f_{\text{дискр}}=10$ кГц, что позволяет учесть особенности формы сетевого напряжения, так как за один период сетевой частоты при этом производится 200 замеров сигнала.

С помощью измерительной аппаратуры учебного стенда совместно с пользовательской программой в среде LabVIEW были зафиксированы массивы данных изменения угловой частоты вращения вала, а также статорных напряжений и токов электродвигателя (рисунок 4.3).

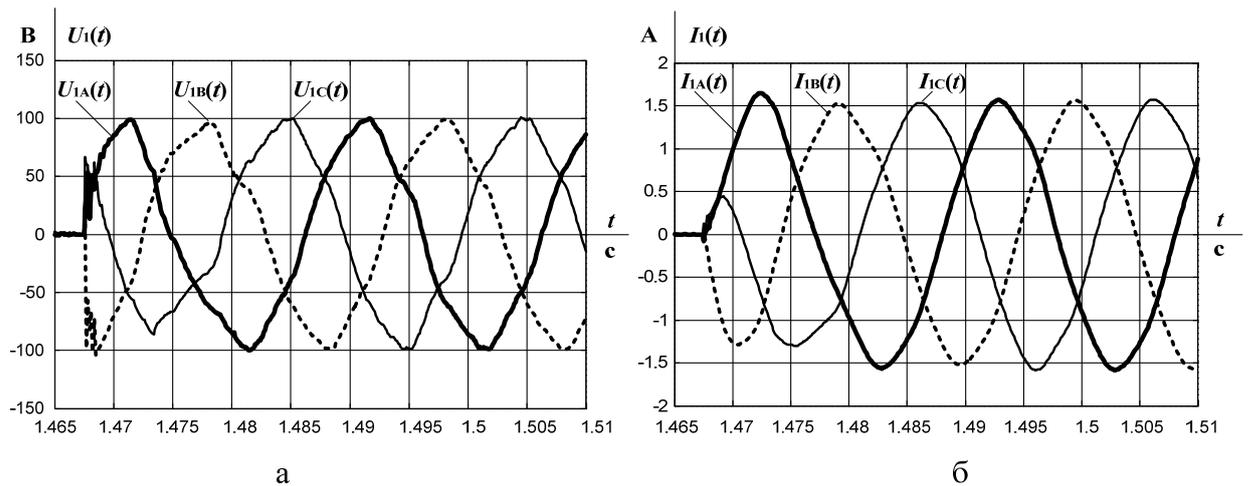


Рисунок 4.3. Осциллограммы статорных напряжений (а) и токов (б) асинхронного двигателя лабораторного стенда при питании непосредственно от промышленной трехфазной сети переменного тока

С помощью инструмента «Discrete Fourier» в программной среде MATLAB Simulink был произведен гармонический анализ фазных напряжений трехфазной сети. Результаты анализа представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Гармонический анализ фазных напряжений трехфазной сети

Номер гармоники	Амплитуда гармоники, [В]		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	98,5	98	99,1
3	0,45	0,3	0,2
5	3,7	3,7	3,9
7	1,02	1,1	1,4
9	0,2	0,2	0,3
11	0,45	0,49	0,55

Данные таблицы 4.3 численно подтверждают факт несинусоидальности питающих напряжений.

Для проверки работоспособности наблюдателя экспериментальные данные импортировались в программную среду MATLAB Simulink. Статорные напряжения и токи двигателя, измеренные в трехфазной системе координат, были с помощью прямого преобразования Кларка переведены в двухфазную неподвижную систему координат α - β (рисунки 4.4, 4.5).

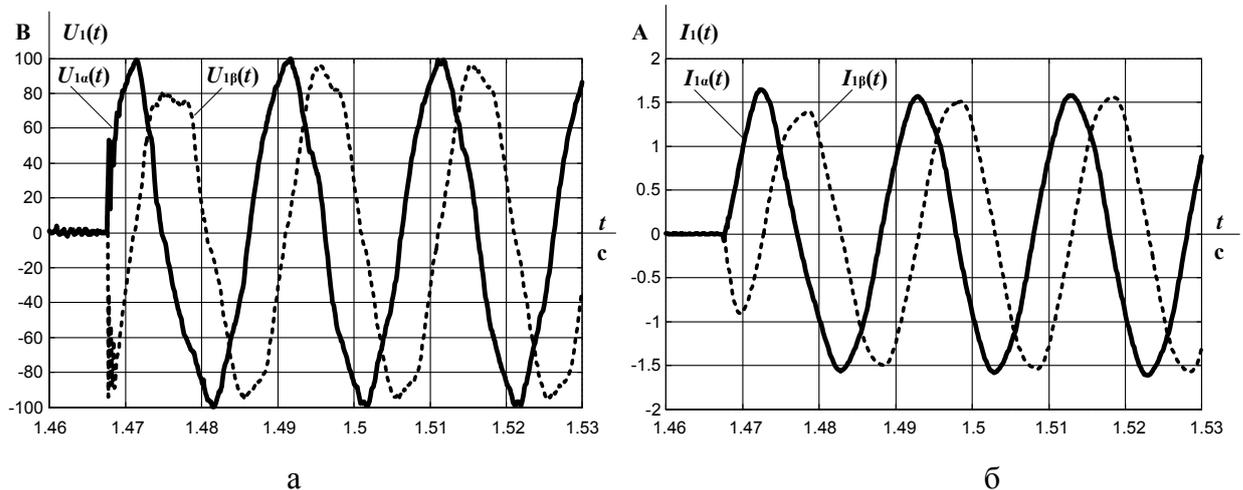


Рисунок 4.4. Статорные напряжения (а) и токи (б) асинхронного электродвигателя в системе координат α - β

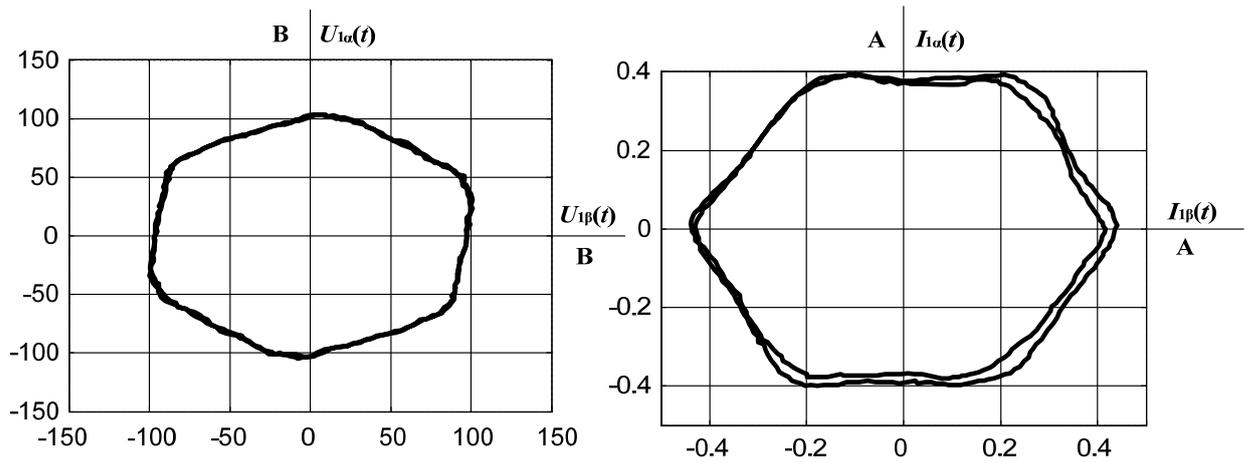


Рисунок 4.5. Векторы результирующих модулей статорных напряжений (а) и токов (б) в осях двухфазной неподвижной системы координат α - β за два периода сетевого напряжения

На рисунке 4.6 приведены переходные процессы угловой частоты вращения двигателя и ее оценки, рассчитанной разработанным наблюдателем.

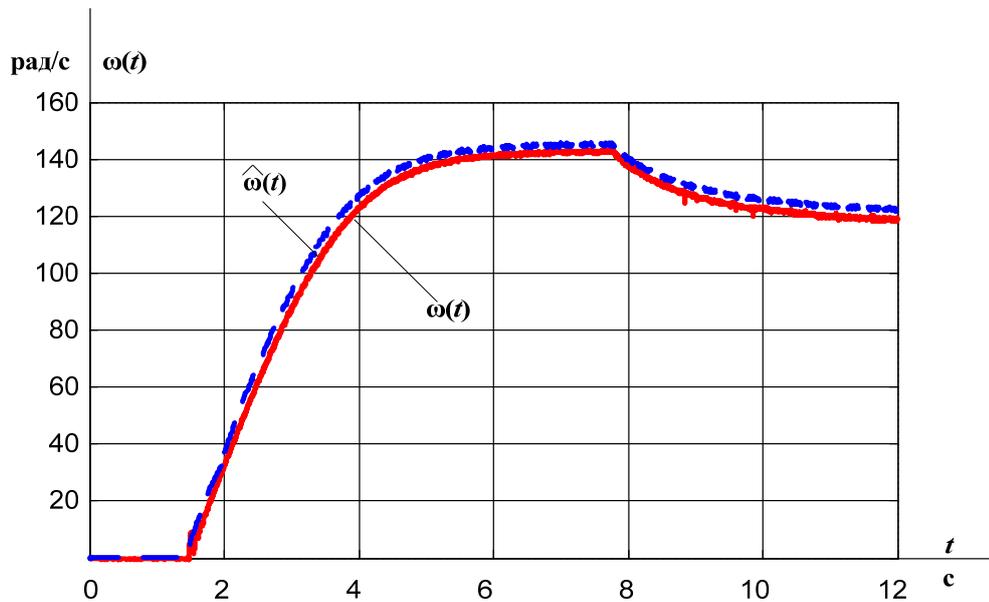


Рисунок 4.6. Переходные процессы угловой частоты вращения вала лабораторного двигателя и ее оценки

Графические зависимости рисунка 4.6 свидетельствуют об адекватном процессе идентификации скорости вала двигателя с точки зрения быстродействия.

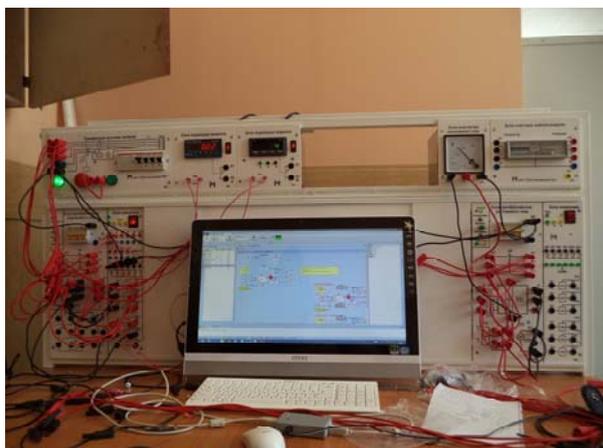
В таблице 4.4 сведены значения ошибок по скорости в установившихся режимах.

	Режимы работы	
	Холостой ход	Нагруженный режим
$\Delta\omega_{уст}, \%$	1,75	2,94

Из результатов таблицы 4.4 можно сделать вывод о том, что разработанный наблюдатель производит оценку скорости в нагруженном режиме со статической ошибкой, не превышающей 5 %, что является приемлемым в инженерной практике.

4.2. Идентификация скорости вращения вала и электромагнитного момента асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты

Для проверки возможности оценивания электромагнитного момента разработанным наблюдателем на втором этапе экспериментальной апробации были проведены исследования на лабораторном стенде с датчиком момента (рисунок 4.7).



а



б

Рисунок 4.7. Внешний вид лабораторного стенда с датчиком момента:

а – панель блоков силовых преобразователей и измерительных приборов;

б – силовой агрегат

В состав лабораторного стенда входили силовой агрегат, состоящий из асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока, оборудованный

датчиками скорости и момента, трехфазный источник питания, блоки преобразователей постоянного и переменного тока для управления машинами, блоки измерения с датчиками тока и напряжения, цифровой мультиметр, блоки индикации скорости и момента, а также моноблок с установленным программным обеспечением, позволяющим осуществлять управление силовым агрегатом.

Трехфазный источник питания включал в себя три однофазных автоматических выключателя, четырехполюсное устройство защитного отключения и контактор подачи питания с элементами управления и индикации.

Блок преобразователя переменного тока состоял из трехфазного преобразователя частоты с выпрямителем и звеном постоянного тока, блока ручного управления, трехфазного автоматического выключателя, тормозного резистора и выходного синусоидального RC-фильтра.

В состав блока преобразователя постоянного тока входили трехфазный автоматический выключатель, блок ручного управления, понижающий трехфазный трансформатор, трехфазный мостовой преобразователь частоты с выпрямителем и звеном постоянного тока, источник питания возбуждения, а также тормозной резистор.

Силовой агрегат представлял собой спаренные друг с другом с помощью пружинных муфт через датчик момента асинхронный двигатель типа АИР71В2 мощностью $P_{2н}=1,1$ кВт и синхронной скоростью вращения $n_0=3000$ об/мин и двигатель постоянного тока 2ПБ132МГ мощностью $P_{2н}=1,6$ кВт и номинальной скоростью вращения $n_n=1000$ об/мин, который в ходе проведения эксперимента выступал в качестве нагрузочного.

На валу агрегата установлен энкодер, выступающий в качестве датчика скорости. Измерение электромагнитного момента на валу двигателя осуществлялось с помощью датчика момента TRB-5K, работающего на тензометрическом принципе.

Блок измерения включал в себя 16-канальный модуль аналогово-цифрового преобразования с USB-интерфейсом, три датчика тока на 25 А фирмы Honeywell, три датчика напряжения на 500 В, а также вспомогательный блок питания.

Исследованию были подвержены динамические режимы пуска двигателя на максимальную скорость при минимальной нагрузке и дальнейшего кратковременного нагружения двигателем постоянного тока. В силу аппаратных ограничений лабораторной установки в ходе проведения эксперимента массивы данных снимались с частотой дискретизации $f_{\text{дискр}}=1$ кГц.

Записанные в виде массивов данных трехфазные системы статорных сигналов были импортированы в MATLAB Simulink, где производилось их преобразование в двухфазную неподвижную систему координат (рисунки 4.8–4.9).

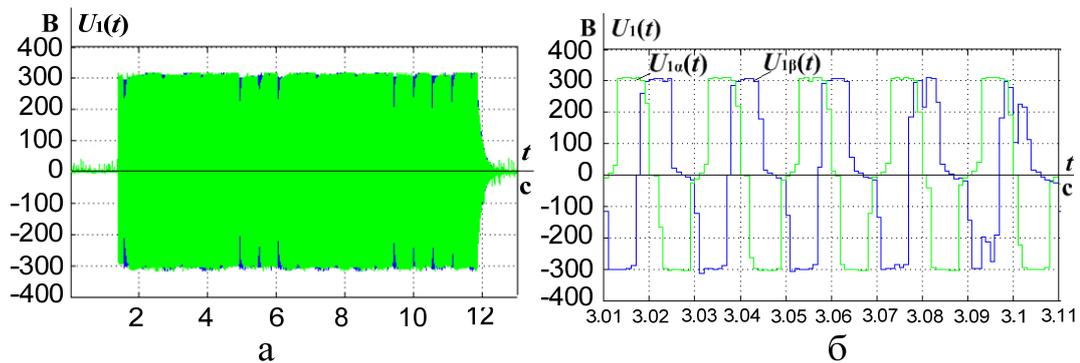


Рисунок 4.8. Статорные напряжения в системе координат α - β :

а – за полное время переходных процессов; б – в увеличении

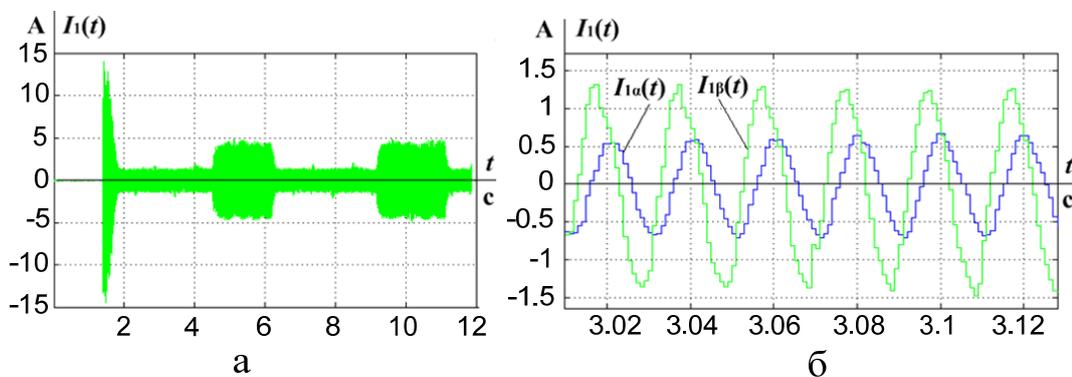


Рисунок 4.9. Статорные токи в системе координат α - β :

а – за полное время переходных процессов; б – в увеличении

На рисунке 4.10 приведены переходные процессы угловой частоты вращения и электромагнитного момента на валу двигателя АИР71В2 лабораторного стенда и соответствующие им оценки наблюдателя.

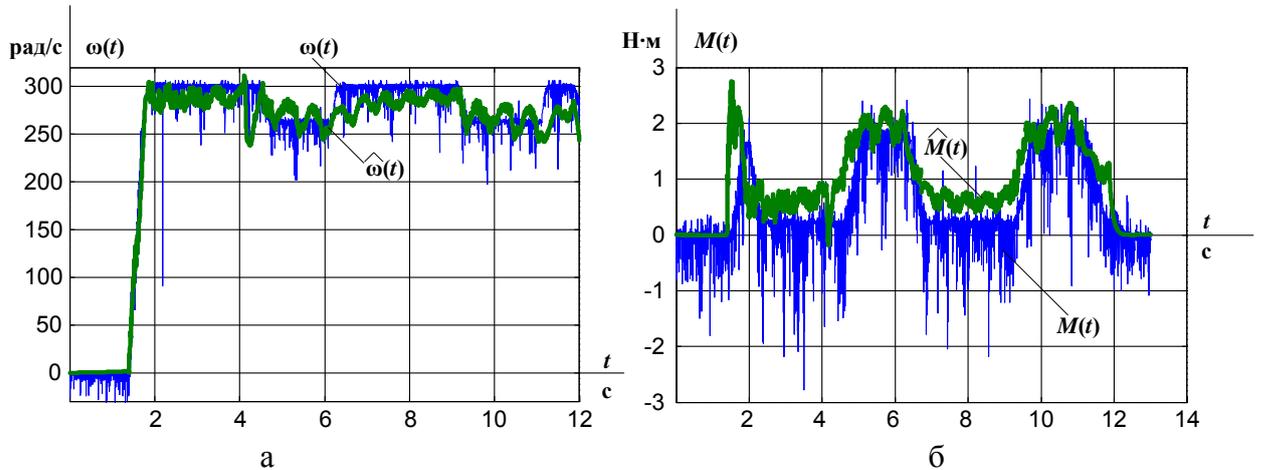


Рисунок 4.10. Переходные процессы в двигателе и соответствующие им оценки: а – угловой частоты вращения вала; б – электромагнитного момента

Значения погрешностей оценки переменных двигателя в установившемся режиме сведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

	Холостой ход	Нагруженный режим
$\Delta\omega_{уст}, \%$	3,6	1,9
$\Delta M_{уст}, \%$	40	5,3

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемый наблюдатель адекватно производит расчет момента и угловой частоты вращения вала двигателя со статической ошибкой в нагруженном режиме, не превышающей пяти процентов.

4.3. Экспериментальное исследование в режиме реального времени параметрической робастности разработанного наблюдателя

Итоговым этапом в экспериментальных исследованиях стало исследование 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.

Для исследования параметрической робастности наблюдателя был использован лабораторный стенд (рисунки 4.11 – 4.12), внешне представляющий собой переносной шкаф габаритами 650x450x250 мм, в котором смонтирован агрегат из двух спаренных двигателей и комплект МСВ (Motor Control Board) для управления двигателями. Для визуализации процессов в электроприводе и осуществления управления стенд оснащен ноутбуком со специальным программным обеспечением.

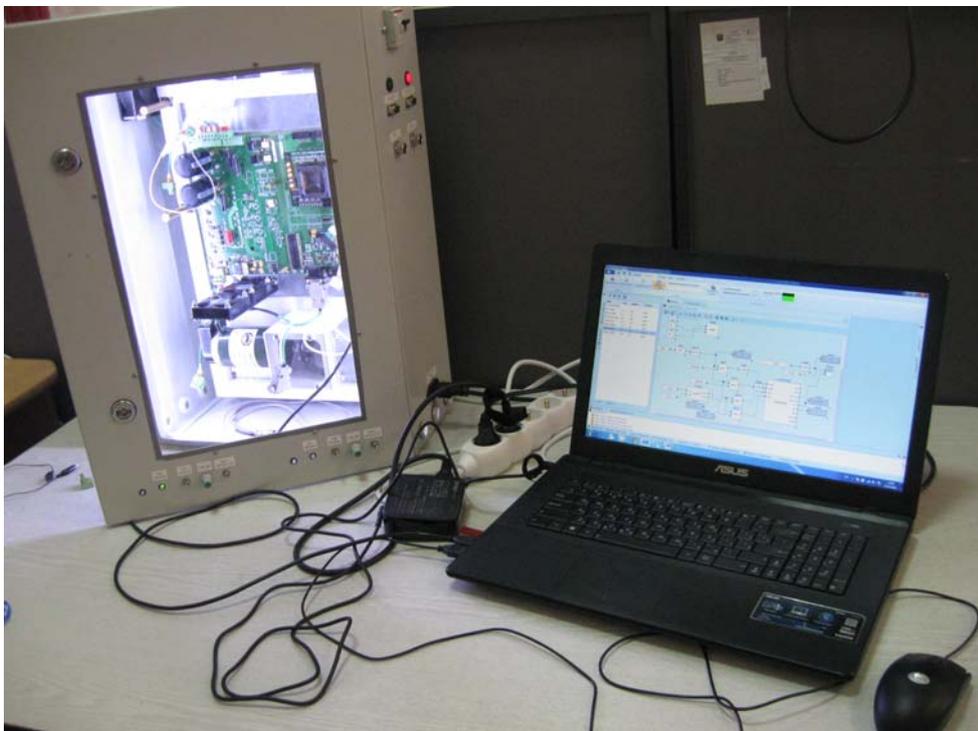


Рисунок 4.11. Общий вид экспериментальной установки для исследования параметрической робастности наблюдателя в режиме реального времени

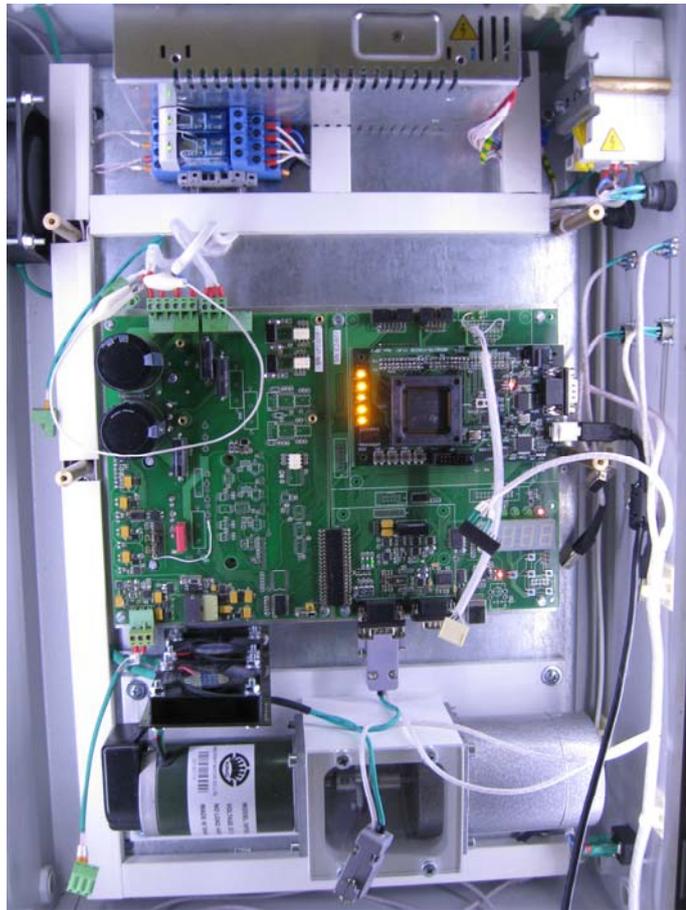


Рисунок 4.12. Внешний вид шкафа с оборудованием

В состав электромашинного агрегата входили асинхронный двигатель типа УАД 72Ф мощностью $P_{2н}=70$ Вт и синхронной скоростью вращения $n_0=3000$ об/мин, а также двигатель постоянного тока типа SVF5539, укомплектованный датчиком скорости – энкодером.

Отладочной комплект МСВ-04 выполнял функции управления асинхронным электродвигателем. В его состав входили:

- процессорный модуль на базе микроконтроллера TMS 320LF2812;
- силовая плата на базе двух модулей IGBT-транзисторов (каждый модуль представляет собой трехфазный мост из шести транзисторов с обратными диодами со схемами драйверов и защиты), содержащая также датчики токов фаз электродвигателя, датчик напряжения в звене постоянного тока, датчик температуры модуля;

– интерфейсная плата для осуществления связи микроконтроллера с силовой частью комплекта, включающая в себя жидкокристаллический индикатор, кнопки, элементы дискретного и аналогового ввода-вывода.

Наличие встроенного ПЗУ, ЦАП, АЦП и других компонентов позволяет комплекту осуществлять поддержку большинства необходимых функций стандартных сервоприводов и преобразователей частоты. Основные характеристики комплекта МСВ-04 представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Основные характеристики комплекта отладочного МСВ-04

Типы электродвигателей	<ul style="list-style-type: none"> – Синхронный – Асинхронный – Бесколлекторный постоянного тока – Коллекторный постоянного тока
Программная платформа	– MexBIOS с возможностью перепрограммирования алгоритмов работы блока в среде визуальной разработки программы
Микроконтроллер системы управления	– TMS 320LF2812, TMS 320F2803х, TMS 320F2823х, TMS 320F2833х
Интерфейс датчиков обратной связи	<ul style="list-style-type: none"> – Тахогенератор – Инкрементный энкодер – Датчики Холла (3 фазы)
Силовое питание	<ul style="list-style-type: none"> – От источника переменного тока: не более 400 В – От источника постоянного тока: не более 600 В
Допустимый силовой ток (радиатор – алюминиевая пластина)	<ul style="list-style-type: none"> – Длительный ток инвертора: не более 5 А – Максимальный ток инвертора: не более 35 А

Базовая частота дискретизации	– В контуре положения: до 500 Гц – В контуре скорости: до 1 кГц – В контуре тока: до 12 кГц
Аналоговые входы (групповая развязка)	– 4 (-5...+5 В или 0...10 В)
Аналоговые выходы (групповая развязка)	– 2 (...+5 В)
Дискретные выходы (групповая развязка)	– 4
Релейный выход	– 1
Коммуникации	– RS-232\$ RS-486; USB
Кнопки управления	– 12
Индикация	– ЖК индикатор – светодиоды
Напряжение питания цепей управления	– 18...24 В либо 220 В переменного напряжения
Габариты (ДхШхВ)	– (300х210х65)

В качестве программной платформы использовалась предустановленная во Flash-памяти процессора операционная среда реального времени MexBIOS, разработанная ООО «НПФ Мехатроника-Про» и предназначенная для управления электродвигателями и робототехническими комплексами. В этом случае для разработки и моделирования системы управления электроприводом применяется визуальная среда разработки программного обеспечения MexBIOS Development Studio. В указанной среде для исследования в режиме реального времени был создан блок разработанного наблюдателя состояния (рисунок 4.13). Текст программного кода наблюдателя приведен в ПРИЛОЖЕНИИ В.

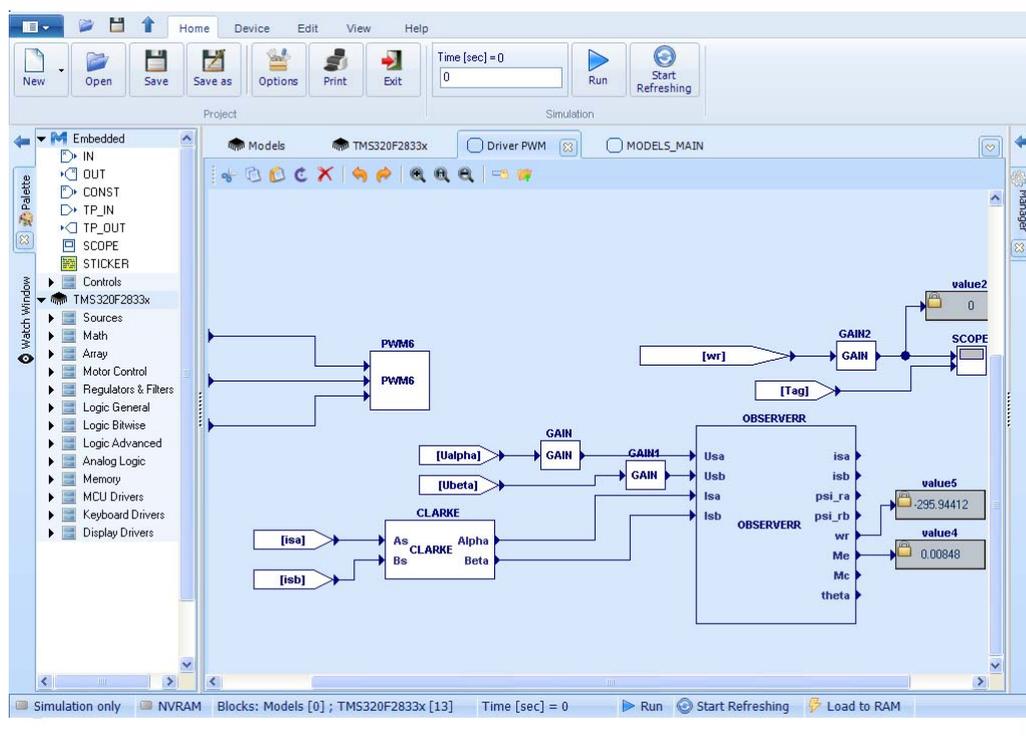


Рисунок 4.13. Внешний вид среды MexBIOS Development Studio с разработанным блоком наблюдателя состояния АД (OBSERVERR)

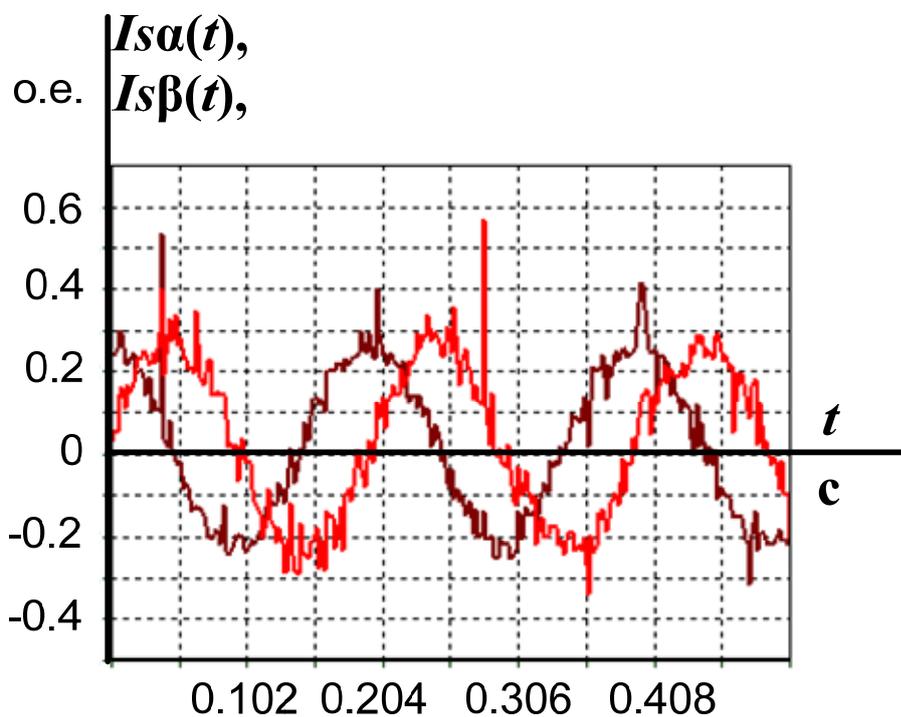


Рисунок 4.14. Статорные токи асинхронного электродвигателя в двухфазной неподвижной системе координат

Для проверки работоспособности созданного блока наблюдателя в режиме реального времени были получены графики переходных процессов угловой скорости вала двигателя лабораторного стенда и ее оценки наблюдателем при пуске вхолостую и под нагрузкой в диапазоне регулирования скорости 1:100 от номинальной (рисунки 4.15 – 4.19).

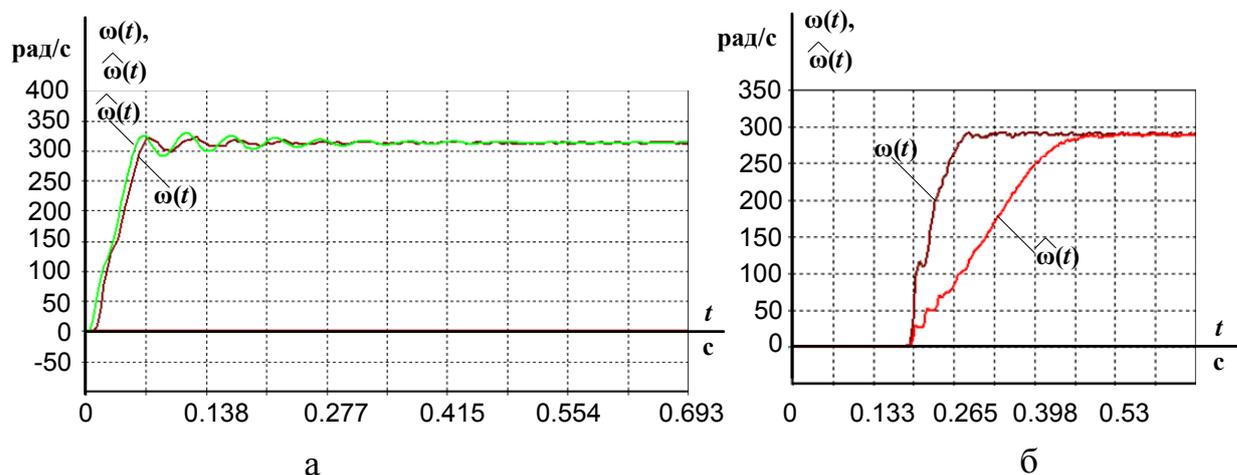


Рисунок 4.15. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при максимальном задании на скорость: а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

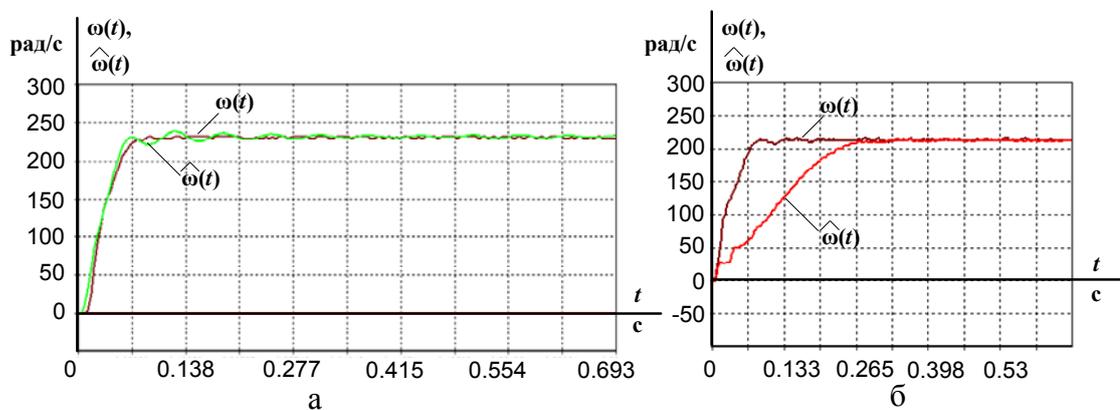


Рисунок 4.16. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при задании на скорость $\omega_{\text{зад}} = 0,75\omega_{\text{макс}}$: а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

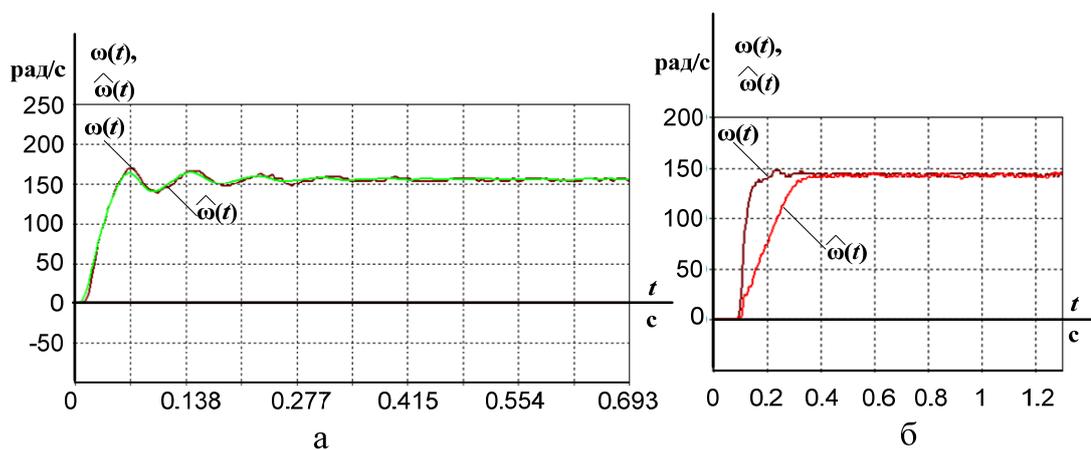


Рисунок 4.17. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при задании на скорость $\omega_{\text{зад}} = 0,5\omega_{\text{макс}}$: а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

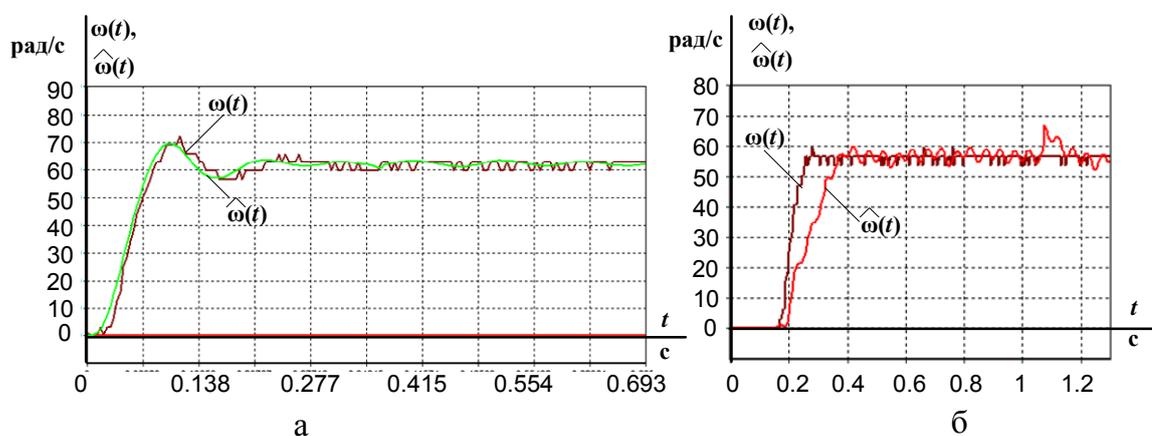


Рисунок 4.18. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при задании на скорость $\omega_{\text{зад}} = 0,25\omega_{\text{макс}}$: а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

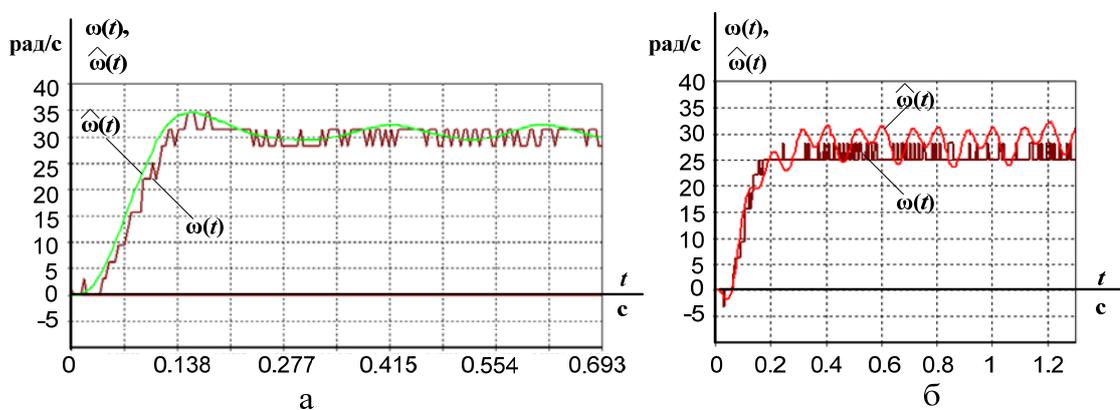


Рисунок 4.19. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при задании на скорость $\omega_{\text{зад}} = 0,1\omega_{\text{макс}}$: а – при пуске вхолостую; б – при пуске под нагрузкой

Программа исследований параметрической робастности разработанного наблюдателя заключалась в получении графиков переходных процессов угловой скорости вала АД стэнда и ее оценки наблюдателем при пуске двигателя холостую и под нагрузкой в диапазоне регулирования скорости 1:100 вниз от номинальной в условиях вариации параметров наблюдателя. В качестве варьируемых параметров были приняты активные сопротивления.

На рисунках 4.20 – 4.23 представлены графики переходных процессов угловой скорости вращения двигателя и ее оценки при пуске под нагрузкой в условиях варьирования параметров наблюдателя.

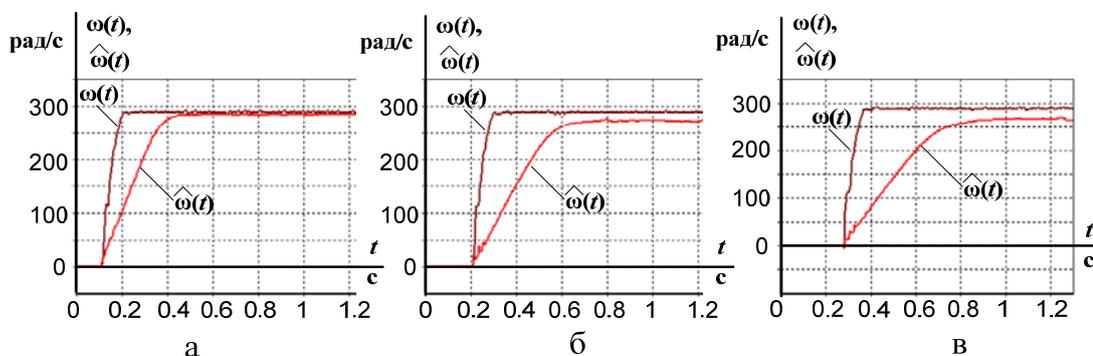


Рисунок 4.20. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на максимальную скорость: а – при $R_s=1,2R_{SH}$; $R_r=1,2R_{TH}$;
б – при $R_s=1,4R_{SH}$; $R_r=1,4R_{TH}$; в – при $R_s=1,6R_{SH}$; $R_r=1,6R_{TH}$

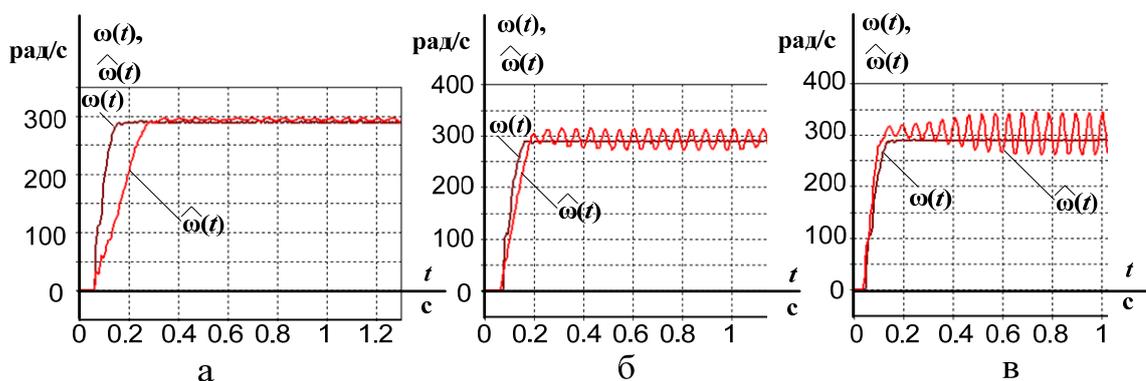


Рисунок 4.21. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на максимальную скорость: а – при $R_s=0,8R_{SH}$; $R_r=0,8R_{TH}$;
б – при $R_s=0,6R_{SH}$; $R_r=0,6R_{TH}$; в – при $R_s=0,4R_{SH}$; $R_r=0,4R_{TH}$

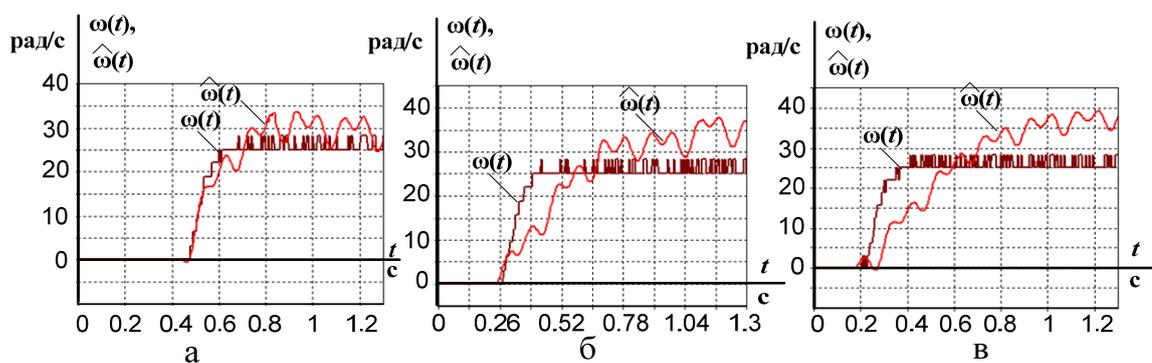


Рисунок 4.22. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на минимальную скорость: а – при $R_s=1,2R_{сн}$; $R_r=1,2R_{гн}$;
 б – при $R_s=1,4R_{сн}$; $R_r=1,4R_{гн}$; в – при $R_s=1,6R_{сн}$; $R_r=1,6R_{гн}$

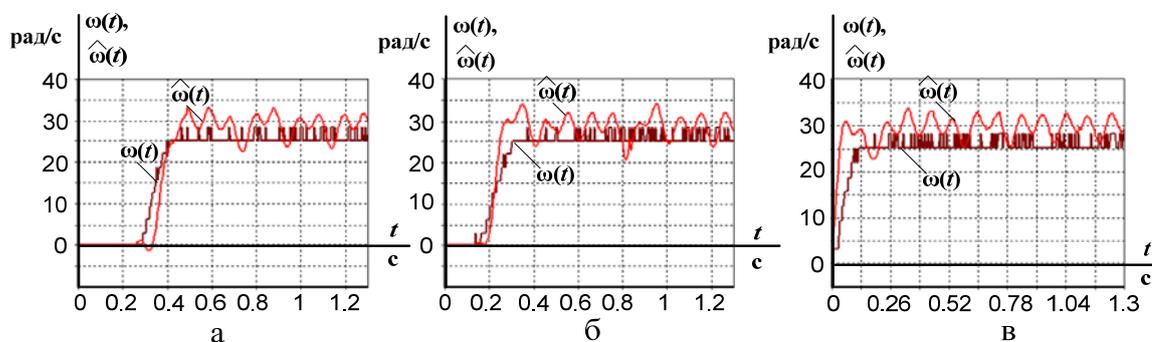


Рисунок 4.23. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске под нагрузкой на минимальную скорость: а – при $R_s=0,8R_{сн}$; $R_r=0,8R_{гн}$;
 б – при $R_s=0,6R_{сн}$; $R_r=0,6R_{гн}$; в – при $R_s=0,4R_{сн}$; $R_r=0,4R_{гн}$

На рисунках 4.24 – 4.26 представлены графики переходных процессов угловой скорости вращения двигателя и ее оценки при пуске вхолостую в условиях варьирования параметров наблюдателя.

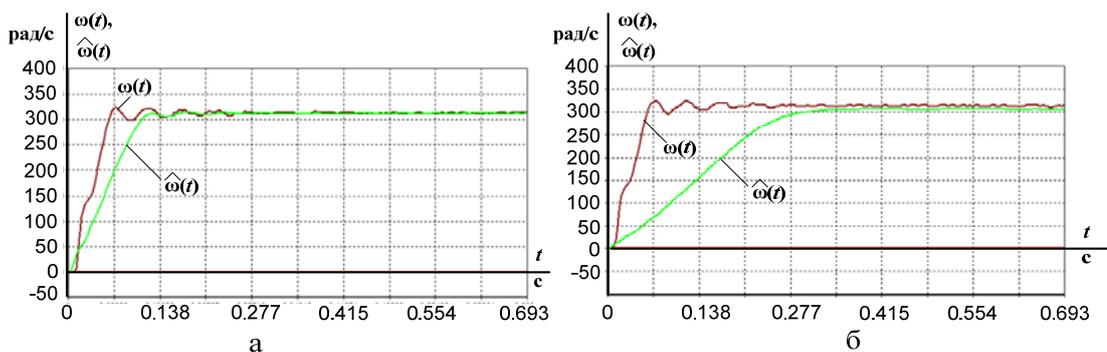


Рисунок 4.24. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске вхолостую на максимальную скорость: а – $R_s=2R_{s^*}$; $R_r=2R_{r^*}$; б – $R_s=4R_{s^*}$; $R_r=4R_{r^*}$

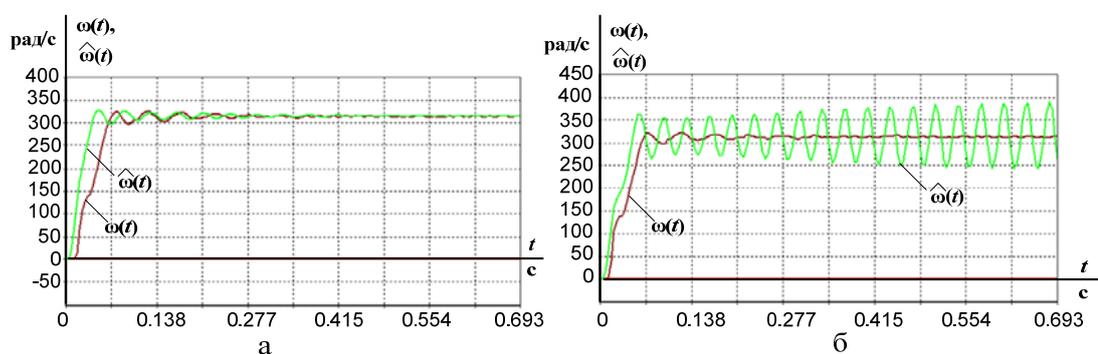


Рисунок 4.25. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске вхолостую на максимальную скорость: а – $R_s=0,5R_{s^*}$; $R_r=0,5R_{r^*}$; б – $R_s=0,25R_{s^*}$; $R_r=0,25R_{r^*}$

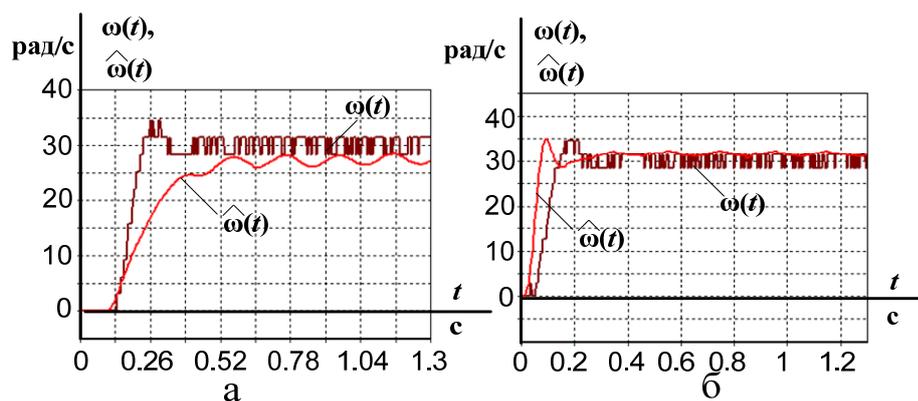
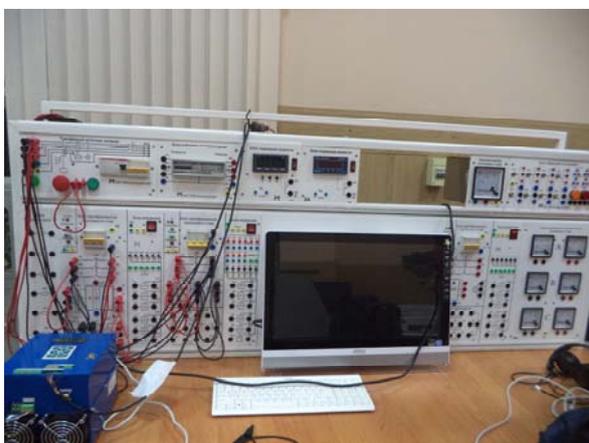


Рисунок 4.26. Переходные процессы угловой частоты вращения вала двигателя и ее оценки в реальном времени при пуске вхолостую на минимальную скорость: а – $R_s=2R_{s^*}$; $R_r=2R_{r^*}$; б – $R_s=0,5R_{s^*}$; $R_r=0,5R_{r^*}$

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

4.4. Отработка наблюдателем ненулевых начальных условий в режиме реального времени

Для проверки работоспособности разработанного наблюдателя в режимах изменения скорости электропривода, реверса и останова был проведен ряд экспериментальных исследований на лабораторном стенде, описание которого представлено в параграфе 4.2. Отличие состояло в том, что в качестве испытуемого электродвигателя выступала асинхронная машина типа АИР90L4 ($P_n=2,2$ кВт, $n_0=1500$ об/мин). Общий вид стенда представлен на рисунке 4.27.



а



б

Рисунок 4.27. Внешний вид лабораторного стенда с электродвигателем АИР90L4: а – панель блоков силовых преобразователей и измерительных приборов; б – силовой агрегат

Регулирование угловой скорости АД осуществлялось с помощью векторной системы управления. С помощью изменения задания на скорость

были получены переходные процессы пуска электропривода, понижения скорости, реверса и останова, а также их оценки разработанным наблюдателем в режиме реального времени.

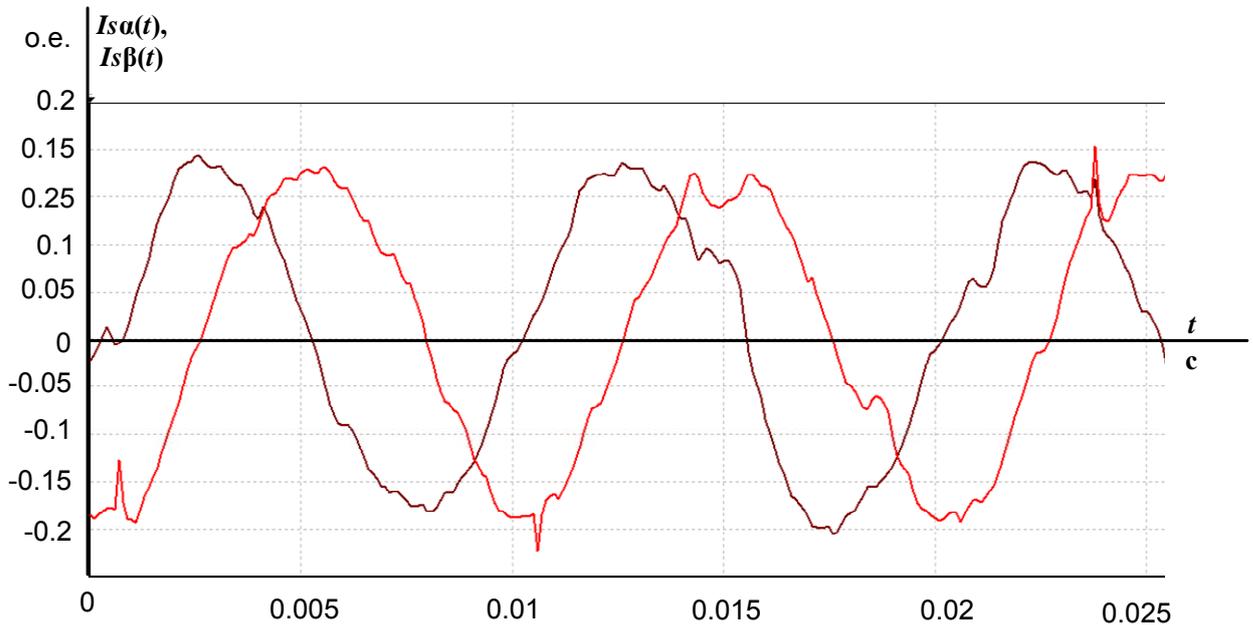


Рисунок 4.28. Статорные токи асинхронного электродвигателя АИР90L4 в двухфазной неподвижной системе координат

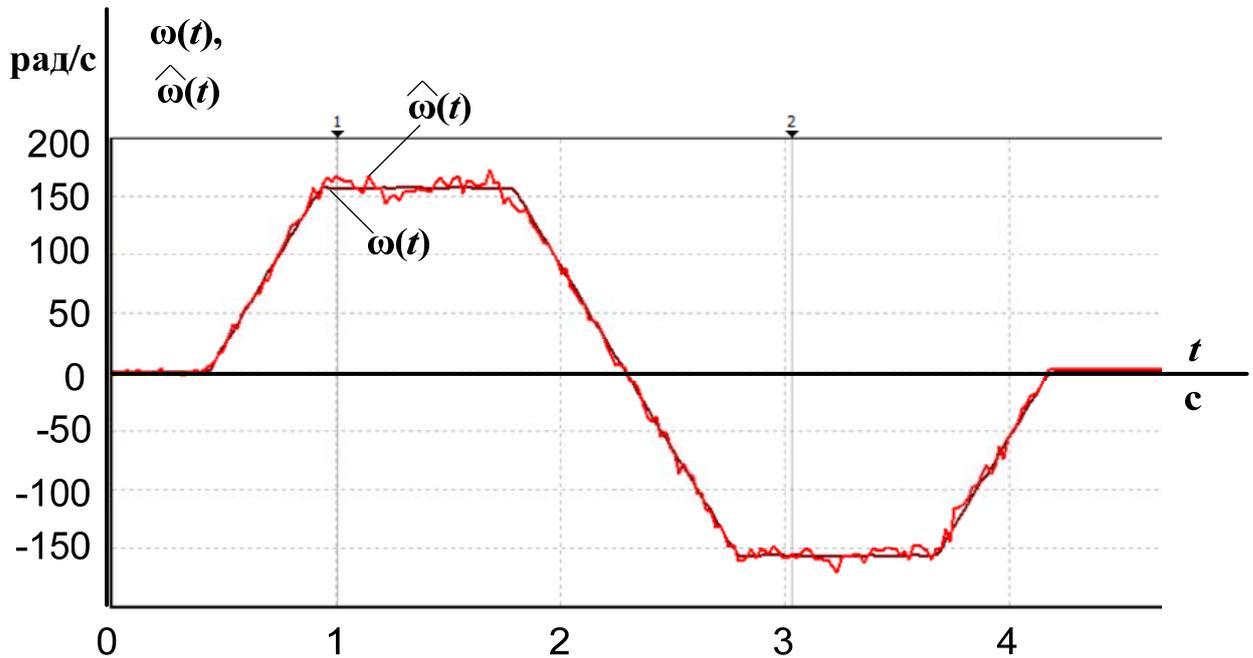


Рисунок 4.29. Переходные процессы угловой скорости вращения двигателя и ее оценки разработанным наблюдателем при пуске электропривода на номинальную скорость, реверсе и останове

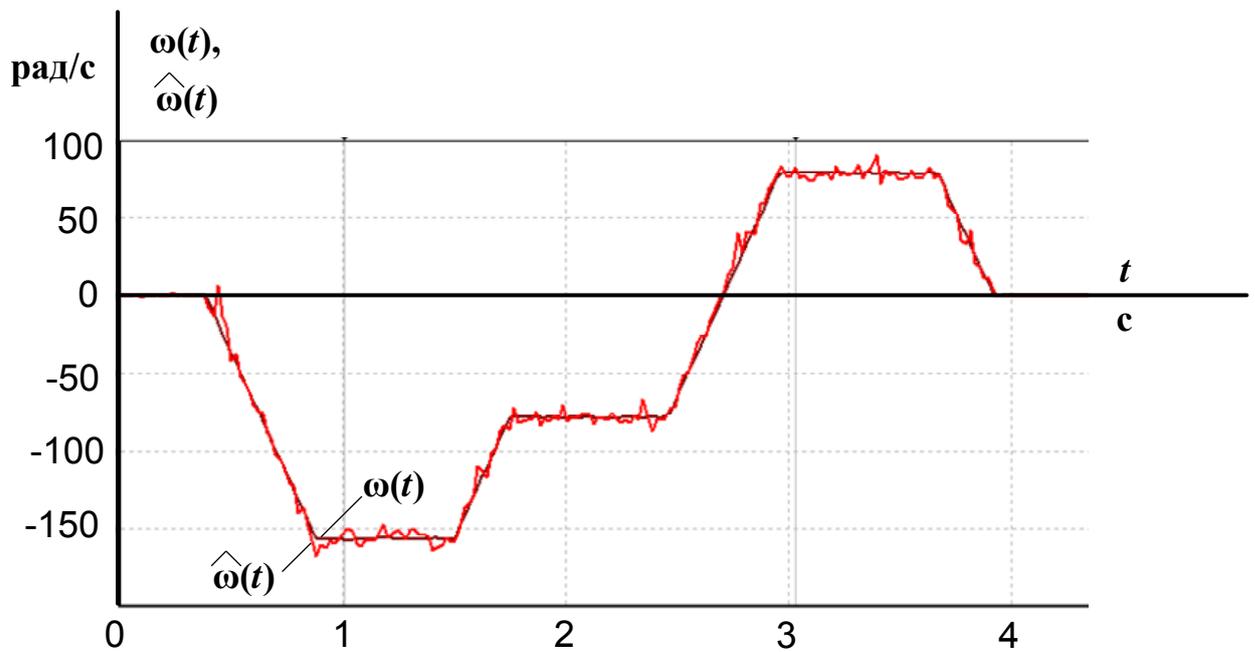


Рисунок 4.30. Переходные процессы угловой скорости вращения двигателя и ее оценки разработанным наблюдателем при пуске электропривода на номинальную скорость, понижении скорости, реверсе и останове

Из графиков видно, что разработанный наблюдатель способен в реальном времени оценивать скорость вращения АД в различных режимах работы электропривода с ненулевыми начальными условиями.

4.5. Выводы по четвертой главе

1. В результате экспериментальных исследований подтверждена работоспособность разработанного наблюдателя при питании асинхронного электродвигателя от промышленной трехфазной сети переменного тока с несинусоидальностью фазных напряжений.
2. Экспериментально подтверждена возможность оценивания угловой скорости вращения и электромагнитного момента АД с помощью разработанного наблюдателя при питании двигателя от преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения.

3. Установлено, что при изменении активных сопротивлений обмоток в пределах от $0,4R_n$ до $1,6R_n$ в диапазоне регулирования скорости двигателя 1:100 разработанный наблюдатель обеспечивает оценку угловой скорости вращения двигателя.

4. Доказано, что наблюдатель способен оценивать скорость вращения двигателя при ненулевых начальных условиях в режимах пуска асинхронного электропривода, реверса и останова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Список использованной литературы

1. Bose B. K. Modern power electronics and AC drives. – Prentice-Hall Inc., 2002. – 711 p.
2. Панкратов В.В., Маслов М.О. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и вариант их решения Опубликовано: Силовая интеллектуальная электроника. – 2007. – №1(6).
3. Афанасьев К. С. , Глазырин А. С. Области применения идентификации состояния асинхронных электродвигателей // Наука, технологии, инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2-4 Декабря 2011. – Новосибирск: НГТУ, 2011 – С. 74-79.
4. Собственные нужды тепловых электростанций / Под ред. Ю. М. Голоднова. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
5. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 41–48.
6. Лазарев Г.Б. Опыт и перспективы применения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в электроэнергетике России // Новости приводной техники. – 2003. – № 5. URL: http://www.privod-news.ru/may_03/25-3.htm (дата обращения 06.12.2014).
7. Петров А.В., Татаринцев Н.И. Модернизация приводов на питателях сырого угля // Современные технологии автоматизации. – 2004. – № 4. – С. 40–44.
8. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ //Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 46–51.
9. Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Этап подготовки к динамической идентификации асинхронных электродвигателей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 39–41.

10. Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Определение параметров и переменных состояния асинхронных электродвигателей в процессе их работы на основе поискового алгоритма оценивания // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 5. – С. 76–79.

11. Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Функциональный контроль параметров и состояния асинхронных электродвигателей // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – № 7. – С. 15–17.

12. Кучер Е.С., Панкратов В.В. Анализ условий идентифицируемости координат и параметров асинхронных электроприводов по основным гармоникам электрических величин // Электротехника. – 2012. – № 09. – С. 14–17.

13. Панкратов В.В., Кучер Е.С. Анализ методов предварительной идентификации постоянной времени ротора асинхронного двигателя в системах электропривода // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2012. – № 1. – С. 127–134.

14. Водовозов А.М., Елюков А.С. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2010. – № 2. – С. 69-71.

15. Макаров В.Г., Яковлев Ю.А. Оценивание параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 418–425.

16. Карлов Б.И. Влияние точности идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя на динамику систем бездатчикового векторного управления // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 3 (29). – С. 38–43.

17. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. – 2012 – Т. 321 – №. 5 – С. 101–105.

18. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С., Полищук В.И. Идентификация параметров асинхронного двигателя с применением генетических алгоритмов // Омский научный вестник. – 2012 – №. 3 (113) – С. 245–248.
19. Blaschke F. The principle of field orientation applied to the new trans-vector closed-loop control system for rotating field machines. – Siemens-Review 39, 1972. – Pp. 217–220.
20. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО ИГЭУ, 2008. – 298 с.
21. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 66 с.
22. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
23. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
24. Kubota H. DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor / H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano // IEEE Trans. Ind. Applicat. – March/April 1993. – vol. 29, no. 2. – pp. 344 – 348.
25. Marchesoni M. A. Simple Approach to Flux and Speed Observation in Induction Motor Drives / P. Segarich , E. Soressi // In Proc. IECON '94. – 1994. – V.1. – P.305–310.
26. Matsuse K. Sensorless control of AC Motor drives / K. Matsuse. – IEEE press book. – 1996.
27. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives / Proceedings of the IEEE, August 2002, vol. 90, no.8. Aug. 2002, pp. 1359-1394.
28. Hinkkanen M. Analysis and Design of Full-Order Flux Observers for Sensorless Induction Motors// IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 51. – № 5. – P. 1033–1040.

29. Поздеев Д.А. Математическое исследование структуры бездатчикового частотно-токового асинхронного электропривода с векторным управлением / С.А. Хрещатая // Электротехника. – 2002. – № 9. – с.37–43.

30. Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Журавлев С.В. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 46–52.

31. Виноградов, А.Б. Колодин И.Ю. Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления // Электричество. – 2007. – №2. – С. 44–50.

32. Панкратов В.В., Маслов М.О. Синтез и исследование одной структуры бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 9–14.

33. Панкратов В.В., Вдовин В.В., Ситников Г.Г., Доманов С.С. Глобально-устойчивый адаптивный наблюдатель для систем общепромышленного асинхронного электропривода // Электротехника. – 2011. – № 06. – С. 42–46.

34. 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; Опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 6 с.: ил.

35. Kalman R.E., Bucy R. New results in linear filtering and prediction // Trans. ASME. 1961. – Vol. 83D. – Pp. 95–108.

36. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси: детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация: пер. с нем.; под ред. И. Е. Казакова. – М.: Наука, 1982. – 200 с.

37. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация параметров и переменных состояния асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV

Международной научно-технической конференции – Томск, 13–16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 413–415.

38. 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.

39. Афанасьев К.Н., Глазырина Т.А., Глазырин А.С. Исследование робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором на основе фильтра Калмана // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы отраслевой научно-технической конференции – Северск, 17-21 мая 2010. – 2010: СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 81.

40. Ланграф С.В., Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Афанасьев К.С., Тимошкин В.В., Козлова Л.Е. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана // Известия Томского политехнического университета, 2010. – Т. 317 – № 4. – С. 120–123.

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

42. Глазырин А.С., Ланграф С.В. Идентификация скорости и момента асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана // Электричество, 2009. – № 12. – С. 61–63.

43. Ланграф С.В., Глазырин А.С. Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением // Известия вузов. Электромеханика, 2009. – № 6. – С. 61–64.

44. Zai L.C. An extended Kalman filter approach to rotor time constant measurement in pwm induction motor drives / Zai L.C., Lipo T.A. // Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. 22nd Annu. Meet., Atlanta, Ga, Oct. 18-23, 1987. Ptl. / New York, N. Y., 1987. – Pp. 177-183.

45. Афанасьев К. С. , Глазырин А. С. Моделирование работы векторного асинхронного электропривода с расширенным фильтром Калмана в цепи обратной связи // 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.

46. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012 – №. 1 (25) – С. 2–7.

47. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей: монография. – Кемерово: КузГТУ, 2005. – 139 с.

48. Gacho J., Zalman M. Im based speed servodrive with Luenberger observer // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, vol. 61, NO. 3, 2010, pp.149–156.

49. Панкратов В.В., Маслов М.О. Синтез и исследование алгоритма идентификации частоты вращения асинхронного электропривода // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 27–34.

50. Вдовин В.В., Панкратов В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2012 . – Т. 320. – № 4. – С. 147-153.

51. 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).

52. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012 – №. 4 (28) – С. 66–69.

53. Luenberger D.G. Observing the state of a linear system // IEEE Trans. Mil. Electron. – 1964. – Vol. MIL-8, April. – Pp. 74–80.

54. Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011 – №. 6 – С. 57–62.

55. Ohyama K. Comparative. Analysis of Experimental Performance and Stability of Sensorless Induction Motor Drives / K. Ohyama, G. Asher, M. Sumner // IEEE Trans. Indus. Electr. – February 2006. – vol. 53, no. 1. – pp. 178 – 186.

56. Вдовин В.В. Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03; Новосибирский государственный технический университет; науч. рук. В. В. Панкратов. – Защищена 15.05.2014 г. – Новосибирск, 2014. – 244 с.

57. Simoes G. Neural Network Based Estimation of Feedback Signals for a Vector Controlled Induction Motor Drive / G. Simoes, B. K. Bose // IEEE Trans. Ind. Applicat. – May/June 1995. – vol. 31, no. 3. – pp. 620 – 629.

58. Браславский И.Я., Зюзев А. М., Ишматов З. Ш., Аверьянов М. А., Барац Е. И., Костылев А. В. Синтез нейронного наблюдателя для асинхронного привода с прямым управлением моментом // Электротехника. – 2001. – № 12. – С. 31 – 34.

59. Браславский И.Я., Костылев А.В., Мезеушева Д.В., Степанюк Д.П. Методы синтеза систем управления асинхронными электроприводами с

использованием нейронных сетей // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 54–58.

60. Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Динамическая идентификация параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 4. – С. 50–51.

61. Козлова Л.Е., Глазырин А.С. Нейросетевой датчик скорости асинхронного двигателя // Тинчуринские чтения: Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции – Казань, 28–29 апреля 2010. – Казань: КГЭУ, 2010. – С. 70-71.

62. Козлова Л. Е., Глазырин А. С. Определение оценки скорости вращения ротора асинхронного электропривода с использованием искусственной нейронной сети [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. 478-479 – 1 опт. электрон. диск (CD - ROM).

63. Ha J.-I. Sensorless Field-Oriented Control of an Induction Machine by High-Frequency Signal-Injection / J.-I. Ha, S.-K. Sul // IEEE Trans. Ind. Applicat. – January/February 1999. – vol. 35, no. 1. – pp. 45 – 51.

64. Заде Л.А., Дезоер Ч.А. Теория линейных систем. Метод пространства состояний: пер. с англ. под ред. Г.С. Поспелова. – М.: Наука, 1970. – 703 с.

65. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления: пер. с англ. – М.: Наука, 1985. – 294 с.

66. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004. – 752с.

67. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова; Н. Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ, 2004. – Т. 1: Математические модели,

динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. – 2004. – 655 с.

68. Пантелеев А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.С. Бортаковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 583 с.

69. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учебное пособие / А.Н. Дилигенская; Самарский государственный технический университет. – Самара: Изд-во Самарского государственного технического университета, 2009. – 136 с.

70. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления: Учебн. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.

71. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова; Н. Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ, 2004 – Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. – 2004. – 638 с.

72. Основы теории автоматического управления, Часть 1. Линейные непрерывные системы управления.: Учебное пособие / Е.Э.Страшинин. Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 217 с.

73. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

74. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

75. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.

76. Чиликин М.Г., Сандлер А.С., Ключев В.И. Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие. – М.: Энергия, 1979. – 615 с.

77. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 265 с.

78. Удут Л.С., Мальцева О. П., Кояин Н. В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8: Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 448 с.

79. Ланграф С.В. Асинхронный моментный электропривод с векторным управлением для имитации усилий запорной арматуры магистральных нефтепроводов: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03; Томский политехнический университет; науч. рук. Р. Ф. Бекишев. – Защищена 30.05.2007 г. – Томск, 2007. – 163 с.

80. Kubota H. Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation / H. Kubota, K. Matsuse // IEEE Trans. Ind. Applicat. – September/October 1994. – vol. 30, no. 5. – pp. 1219 – 1224.

81. Панкратов В.В., Котин Д.А. Синтез адаптивных алгоритмов вычисления скорости асинхронного электропривода на основе второго метода Ляпунова // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 48–53.

82. Афанасьев К.С. , Глазырин А.С. Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 4. – С. 24–30.

83. Hinkkanen M., Luomi J. Parameter Sensitivity of Full-Order Flux Observers for Induction Motors // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2003. – Vol. 39. – № 4. – P. 1127–1135.

84. H. Kubota I. Sato, Y. Tamura, K. Matsuse. Regenerating-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer / IEEE Trans. Ind. Applicat. July/August 2002, vol. 38, no. 4, pp. 1081-1086.

85. Панкратов В.В. Методы синтеза автоматического управления электроприводами переменного тока, малочувствительных к изменениям параметров: дис. ... д-ра техн. Наук. – Новосибирск, 1997. – 479 с.

86. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2000. – 152 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методика расчета параметров схемы замещения
асинхронного электродвигателя АИР90L4

Справочные данные асинхронного электродвигателя типа АИР90L4:

$P_H = 2,2$ кВт – номинальная мощность двигателя;

$U_{1H} = 380$ В – номинальное линейное напряжение;

$U_{1\phi} = 220$ В – фазное напряжение;

$n_0 = 1500$ об/мин – синхронная частота вращения;

$n_H = 1420$ об/мин – номинальная частота вращения;

$\eta_H = 0,81$ – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos \varphi_H = 0,83$ – коэффициент мощности;

$k_i = \frac{I_H}{I_H} = 6$ о.е. – кратность пускового тока;

$k_M = \frac{M_H}{M_H} = 2$ о.е. – кратность пускового момента;

$k_{max} = \frac{M_K}{M_H} = 2,6$ о.е. – кратность максимального момента;

$J_{дв} = 0,01$ кг·м² – динамический момент инерции.

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3,796^2 - (0,75 \cdot 4,958 \cdot (1 - 0,053) / (1 - 0,75 \cdot 0,053))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,053) / (1 - 0,75 \cdot 0,053))^2}} = 1,457 \text{ А,}$$

где $I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,81} = 4,958$ А – номинальный ток

статора двигателя; $I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,813 \cdot 0,81} = 3,796$ А – ток

статора двигателя при частичной нагрузке;

$\eta_{p^*} = \eta_n = 0,81$ – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p^*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_n = 0,98 \cdot 0,83 = 0,813$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_n = 0,75$ – коэффициент загрузки двигателя;

$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053$ – номинальное скольжение двигателя.

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения:

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,053 \cdot \frac{2,6 + \sqrt{2,6^2 - (1 - 2 \cdot 0,053 \cdot 1 \cdot (2,6 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,053 \cdot 1 \cdot (2,6 - 1)} = 0,321 \text{ о.е.}$$

В первом приближении принимаем $\beta=1$.

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{1,457}{2 \cdot 6 \cdot 4,958} = 1,024;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,053)}{2 \cdot 1,024 \cdot 2,6 \cdot 2200} = 11,738.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{11,738}{\left(1 + \frac{1}{0,321}\right) \cdot 1,024} = 2,785 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,024 \cdot 2,785 \cdot 1 = 2,852 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,321^2} - 1^2} = 2,95.$$

Тогда сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 2,95 \cdot 1,024 \cdot 2,785 = 8,413 \text{ Ом.}$$

Для того, чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2\text{н}} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 8,413}{1,024} = 4,765 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки:

$$X_{1\text{н}} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 8,413 = 3,533 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_m = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - R_1 \cdot I_{1\text{н}})^2 + (U_{1\phi} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} - X_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{н}})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,83 - 2,852 \cdot 4,958)^2 + (220 \cdot 0,56 - 3,533 \cdot 4,958)^2} = 198,866 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как:

$$X_{\mu\text{н}} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{198,866}{1,457} = 136,49 \text{ Ом.}$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{1\text{н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{3,533}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,011 \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенная к статорной:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{2\text{н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{4,765}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,015 \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu\text{н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{136,49}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,435 \text{ Гн.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Имитационные модели асинхронного электропривода с наблюдателем состояния в программной среде MATLAB Simulink

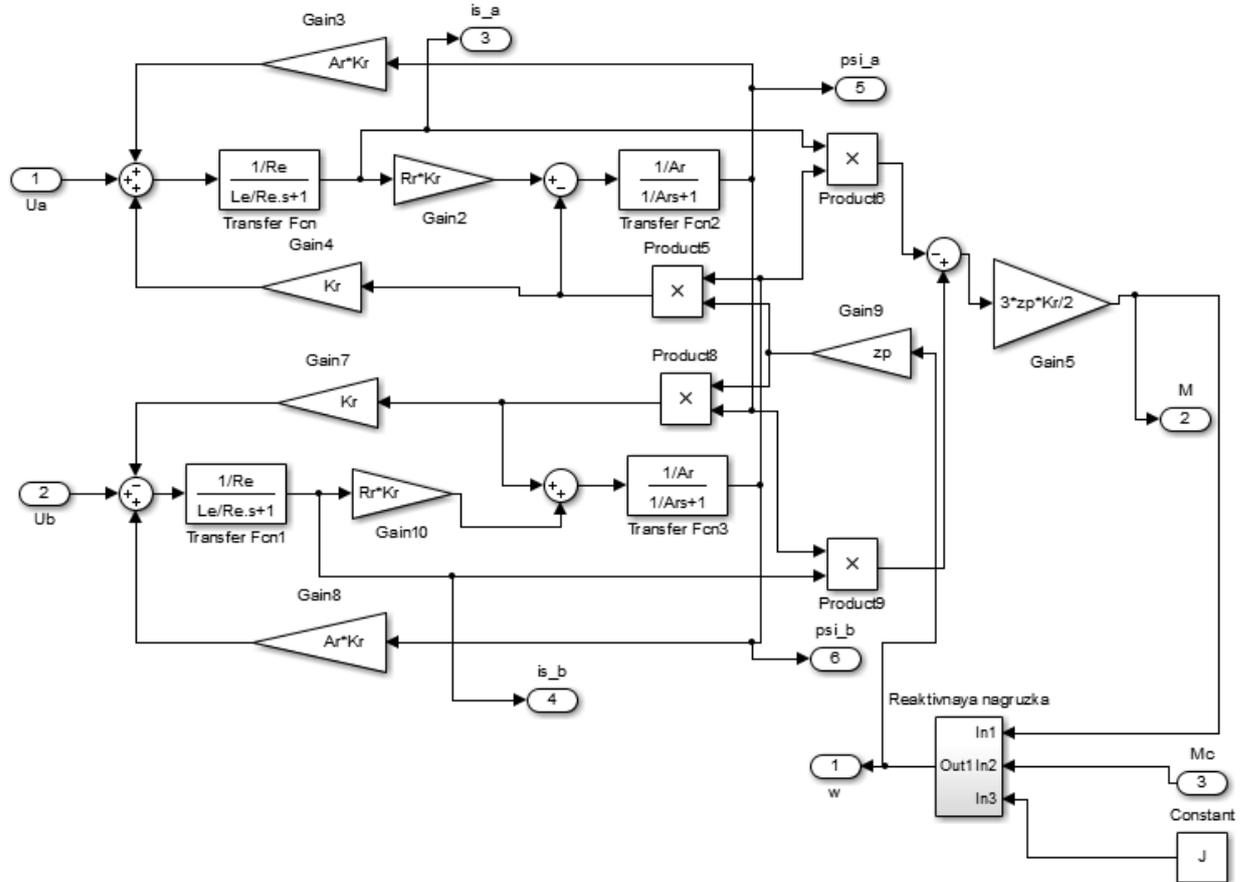


Рисунок Б1. Имитационная модель АД (подсистема «AD»)

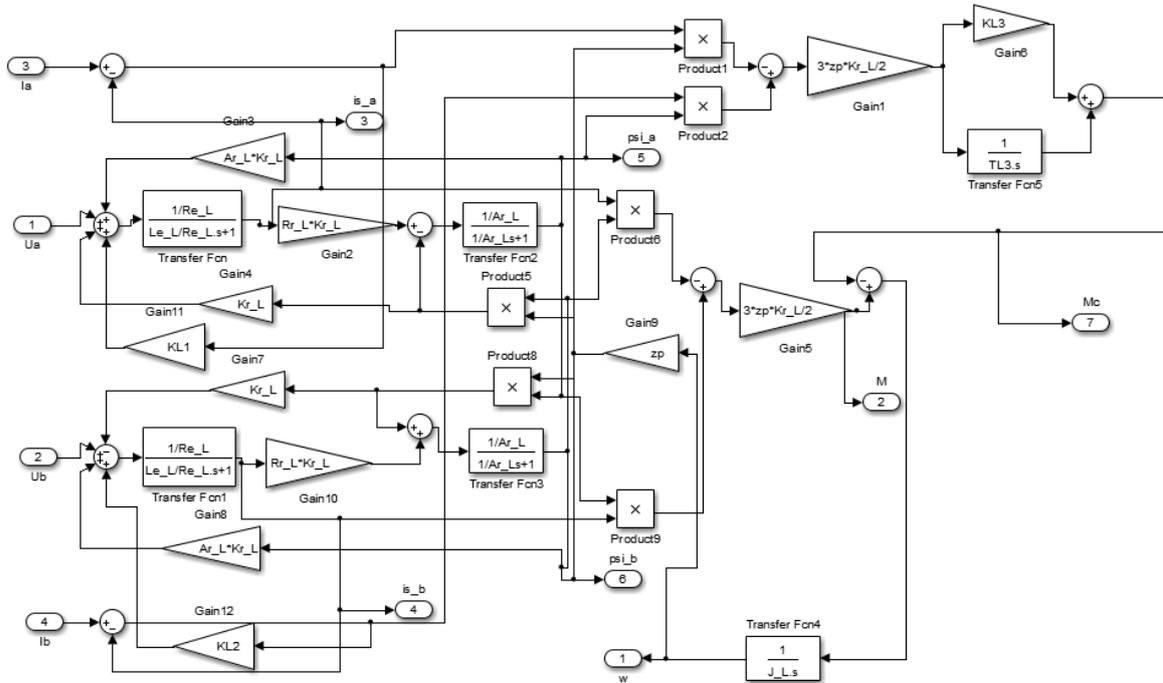


Рисунок Б2. Имитационная модель разработанного наблюдателя (подсистема «OBSERVER»)

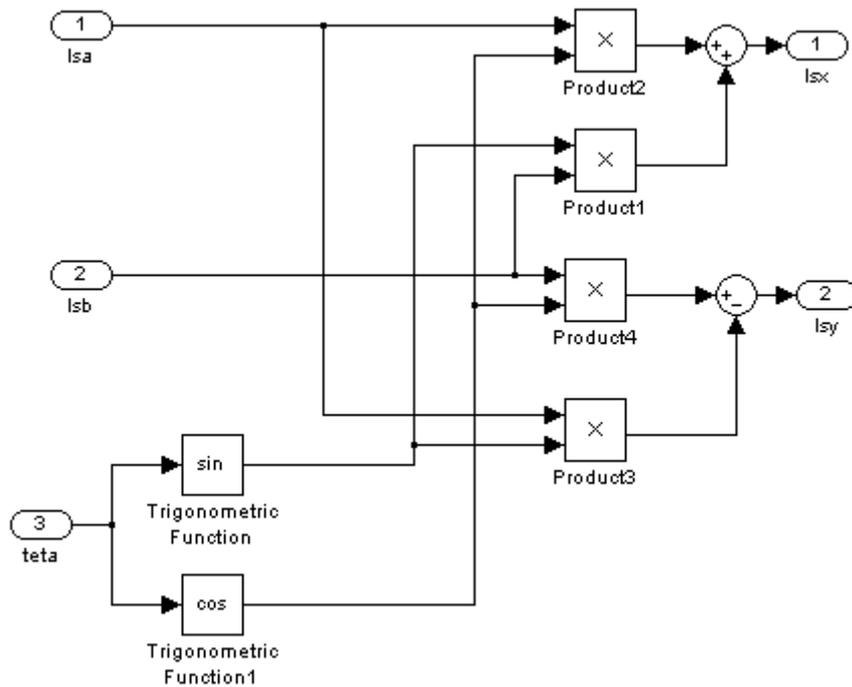


Рисунок Б4. Имитационная модель прямого преобразования Парка (подсистема «Park»)

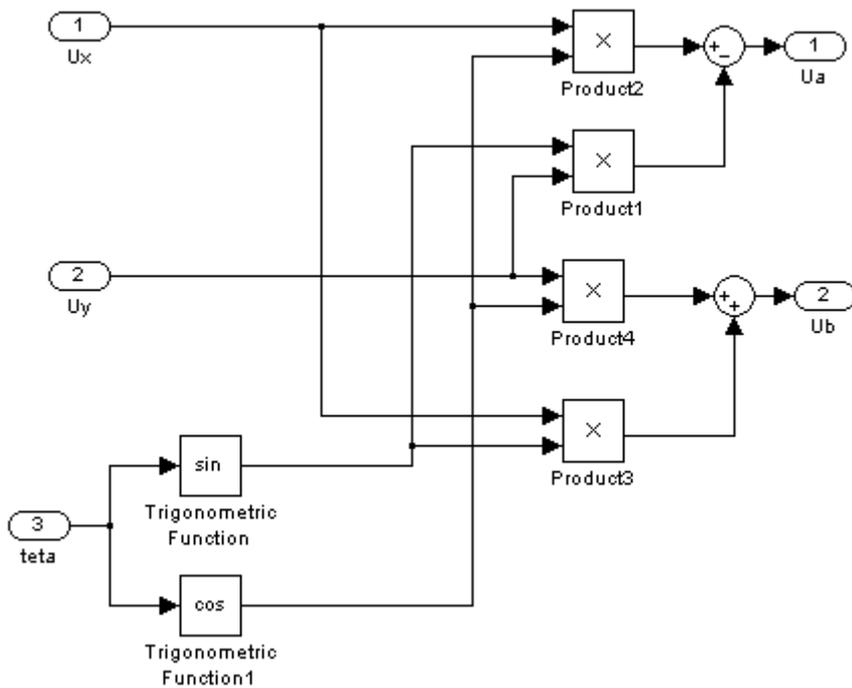


Рисунок Б5. Имитационная модель обратного преобразования Парка (подсистема «Inverse Park»)

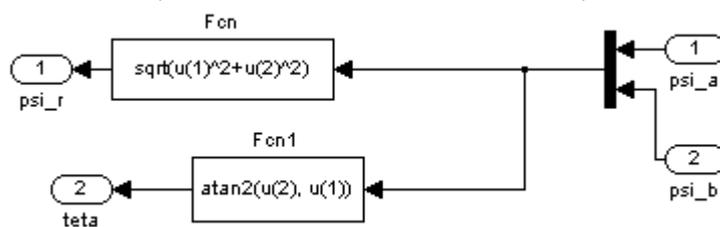


Рисунок Б6. Имитационная модель вычислителя модуля и угла поворота вектора потокосцепления ротора АД (подсистема «Calc»)

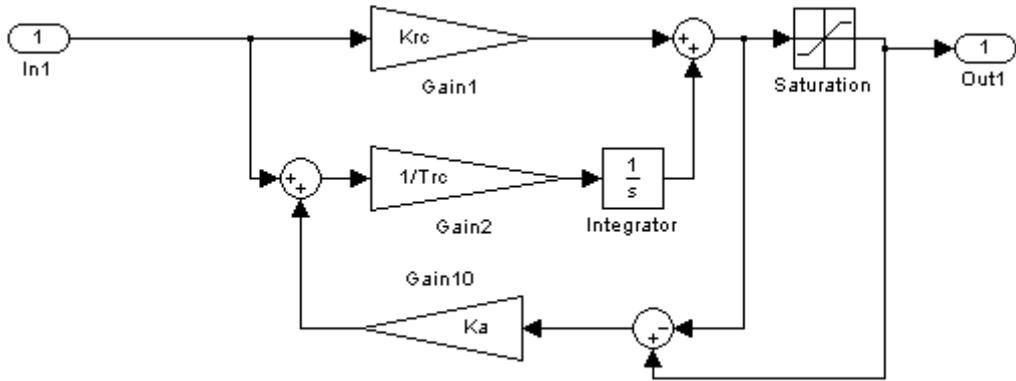


Рисунок Б7. Имитационная модель нелинейного ПИ-регулятора скорости (подсистема «Rw»)

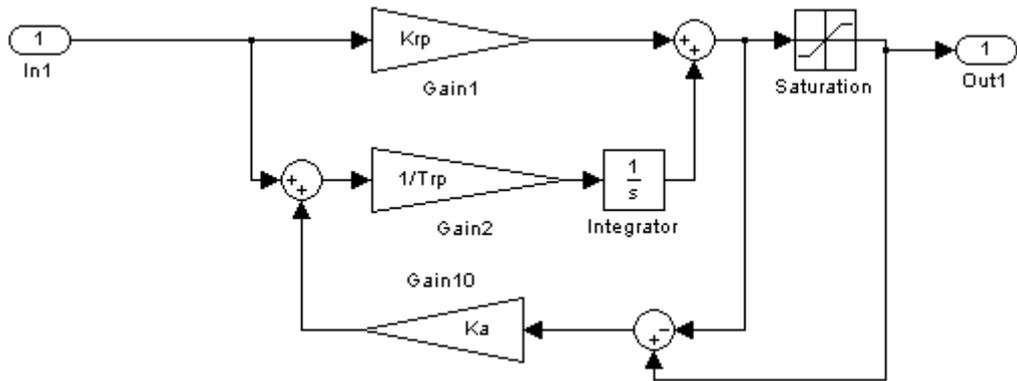


Рисунок Б8. Имитационная модель нелинейного ПИ-регулятора потокосцепления ротора (подсистема «Rpsi»)

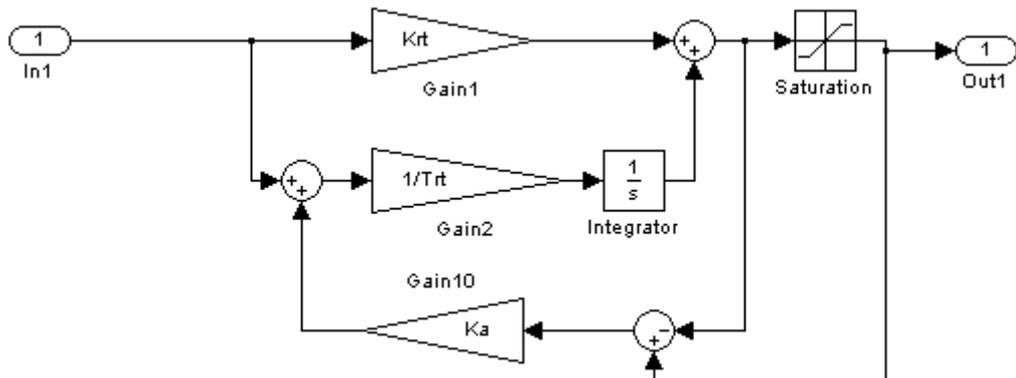


Рисунок Б9. Имитационная модель нелинейного ПИ-регулятора ток статора (подсистемы «RT» и «RT1»)

m-файл параметров модели асинхронного электропривода с наблюдателем состояния (тип двигателя АИР90L4):

```

%Параметры двигателя
n=1420;
w=pi*n/30;
f=50;
Rs=2.852;
Rr=2.785;
Ls_=3.533/(2*pi*f);
Lr_=4.765/(2*pi*f);
Lm=136.49/(2*pi*f)*1;
p=4;
J=0.01;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=(Lr_+Lm);
zp=p/2;
In=4.958;
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=220*sqrt(2);
Iamp=In*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;
Psi=0.95;
%Параметры системы управления
Kinv=1;
finv=10000;
Tinv=1/finv;
Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(2*Tinv*Kinv);
Trt=Te;
Krp=1/(2*2*Kr*Rr*Tinv);
Trp=1/Ar;
Krc=(98*J)/(1.5*zp*8*1024*Tinv*Psi);
Trc=98*Tinv;
Tf=32*4*Tinv;
%Нелинейности
Ux=0.312*Uamp;
Uy=0.95*Uamp;
Ix=1.5*Iamp;
Iy=2*Iamp;
Imax=2*Iamp;
Umax=Uamp;
Ka=1;
%шаг интегрирования
h=0.00001;
%Параметры для Лвенбергера
Rs_L=2.852;
Rr_L=2.785;
Ls_l=3.533/(2*pi*f);
Lr_l=4.765/(2*pi*f);
Lm_L=136.49/(2*pi*f);
J_L=0.01;
Ls_L=Ls_l+Lm_L;
Lr_L=(Lr_l+Lm_L);
Kr_L=Lm_L/Lr_L;
Re_L=Rs_L+Rr_L*Kr_L^2;
Le_L=Ls_L-Lm_L^2/Lr_L;
Ar_L=Rr_L/Lr_L;
KL1=Re_L;
KL2=KL1;
KL3=300; TL3=0.1/Ar_L;

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Текст программного кода разработанного наблюдателя в среде MexBIOS Development Studio

```

void Init(void)
{
}

void Exec(void)
{
float Kr, Re, Le, Ar, Km, K1, T3, Tf;
float pi=3.1415926;
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr*Kr;
Le=Ls-Lm*Lm/Lr;
Ar=Rr/Lr;
Km=1.5*zp*Kr;
K1=Re;
K3=300;
T3=0.1/Ar;
Tf=0.5*T3;

isa=isa+1/Le*(Usa-Re*isa+Kr*Ar*psi_ra+Kr*zp*wr*psi_rb+K1*(Isa-isa))*DeltaT;
isb=isb+1/Le*(Usb-Re*isb+Kr*Ar*psi_rb-Kr*zp*wr*psi_ra+K1*(Isb-isb))*DeltaT;
psi_ra=psi_ra+(Rr*Kr*isa-Ar*psi_ra-wr*zp*psi_rb)*DeltaT; //
psi_rb=psi_rb+(Rr*Kr*isb-Ar*psi_rb+wr*zp*psi_ra)*DeltaT; //
Me=Km*(psi_ra*isb-psi_rb*isa);
wr=wr+1/J*(Me-F*wr-(Mint+K3*Km*(psi_ra*(Isb-isb)-psi_rb*(Isa-isa))))*DeltaT;
Mint=Mint+Km/T3*(psi_ra*(Isb-isb)-psi_rb*(Isa-isa))*DeltaT;
Mc=Mc+1/Tf*(Mint+K3*Km*(psi_ra*(Isb-isb)-psi_rb*(Isa-isa))-Mc)*DeltaT;

if (Brake >0 ) wr=0;

if (psi_ra==0)
{
psi_ra=0.001;
}

if (psi_rb==0)
{
psi_rb=0.001;
}

theta=atan2(psi_rb,psi_ra)/(pi*2)+1;
if (theta >= 1.0) theta= theta - 1.0;
if (theta <= 0) theta = theta + 1.0;

}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты внедрения результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Энергетического
института ТПУ,

доктор технических наук

В.М. Завьялов

« 05 » 2015 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Афанасьева Кирилла Сергеевича в учебном процессе
Энергетического института ТПУ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Афанасьева Кирилла Сергеевича "Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью" внедрены и активно используются в учебном процессе кафедры электропривода и электрооборудования (ЭПЭО) Энергетического института (ЭНИИ) Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Созданные в программной среде MATLAB Simulink имитационные модели позволяют получить качественные картины переходных процессов в асинхронном электроприводе с разработанным наблюдателем состояния асинхронного двигателя, а также исследовать чувствительность электропривода к параметрическим возмущениям при помощи интегрального критерия параметрической робастности, предложенного в диссертационной работе.

Указанные модели используются при обучении магистрантов по направлению 140400 "Электроэнергетика и электротехника" по дисциплине "Моделирование в электроприводе".

Заведующий кафедрой ЭПЭО
кандидат технических наук, доцент

Дементьев Ю.Н.

« 18 » 05. 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО

«НПФ Мехатроника-Про»,

кандидат технических наук

Н.В. Гусев

2015 г.



АКТ

об внедрении результатов диссертационной работы
Афанасьева Кирилла Сергеевича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Афанасьева Кирилла Сергеевича на тему "Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью" использовались при разработке программного обеспечения векторной системы управления асинхронным электроприводом с преобразователем частоты MBS-FC01 с открытой программной платформой на базе микроконтроллера TMS320F28335.

Разработанная в ходе выполнения диссертационной работы структура наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя была реализована в виде компонента библиотеки среды MexBIOS Development Studio, предназначенной для создания программного обеспечения систем управления электродвигателями. Настройка системы управления асинхронным электроприводом подтвердила заявленную автором малую степень чувствительности наблюдателя к изменению внутренних параметров.

Технический директор
ООО «НПФ Мехатроника-Про»,
кандидат технических наук

А.С. Каракулов

A handwritten signature in blue ink, corresponding to the name A.S. Karakulov.



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**Афанасьев Кирилл Сергеевич,
аспирант кафедры ЭПЭО ЭНИН НИ ТПУ**

Победитель III Межвузовского конкурса
исследовательских проектов по направлению:
Традиционная и атомная энергетика,
альтернативные технологии производства энергии
проект № 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”

Ректор ТПУ,
профессор



П.С.Чубик

www.iup.tpu.ru
ТОМСК 2012