

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

УМУРЗАКОВА АНАРА ДАУКЕНОВНА

**КОСВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ
ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

**Специальность 05.09.03
«Электротехнические
комплексы и системы»**

**ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
к. т. н., доцент Ю.Н. Дементьев**

ТОМСК – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК, СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	12
1.1 Необходимость косвенного контроля переменных в технологических процессах.....	12
1.2 Способы контроля выходных переменных асинхронного двигателя в электроприводе.....	16
1.3 Выводы по главе.....	23
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ, АЛГОРИТМЫ И СПОСОБЫ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	25
2.1 Математическое описание асинхронного электродвигателя с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости.....	25
2.2 Алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя.....	36
2.3 Выводы по главе.....	47
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УСТРОЙСТВОМ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	49
3.1 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания асинхронного двигателя.....	49
3.2 Математическое моделирование электропривода с устройством	

косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания асинхронного двигателя	65
3.3 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ напряжения питания асинхронного двигателя.....	73
3.4 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном векторном управлении с учетом ШИМ напряжения питания асинхронного двигателя.....	87
3.5 Выводы по главе.....	90
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УСТРОЙСТВОМ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	92
4.1 Описание экспериментальной установки.....	92
4.2 Результаты экспериментального исследования.....	94
4.3 Выводы по главе.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время асинхронные двигатели являются основой электроприводов (ЭП) в большинстве технологических установок и комплексов.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД) наиболее просты по конструкции, обладают высокими эксплуатационными характеристиками из-за отсутствия в его конструкции контактных узлов и постоянных магнитов, надежны, имеют низкую стоимость по сравнению с другими типами двигателей, минимальную требовательность к обслуживанию, что обусловило широкое распространение АД во всех без исключения отраслях промышленности.

При эксплуатации современных электроприводов, например насосных агрегатов в системах передачи жидкости (СПЖ), возникает постоянная потребность контроля механических выходных переменных АД, который позволяет иметь информацию о технологических параметрах насосных агрегатов, проводить мониторинг загрузки двигателей, и поддерживать скорость в заданных пределах.

С развитием полупроводниковой техники появилась реальная возможность регулирования частоты вращения АД для обеспечения требуемых технологических параметров СПЖ. Применение статических преобразователей частоты позволяет управлять АД насосной станции в соответствии с заданными режимами технологического процесса СПЖ. Кроме того, знание текущих значений параметров и состояния асинхронных двигателей позволяет осуществлять контроль технологического процесса СПЖ и режима работы АД, в процессе работы АД контролировать его техническое состояние, проводить диагностирование с выявлением на ранних этапах появляющихся дефектов, чтобы вовремя их устранить. Однако не во всех технологических процессах СПЖ возможно применение регулируемых ЭП с преобразователями частоты.

Вопросами решения задач идентификации параметров и контроля выходных переменных АД, а также технических решений для их реализации занимались и продолжают заниматься ученые различных стран. Большой вклад в исследования этой области внесли: Чиликин М. Г., Копылов И.П., Рудаков В.В., Потапов Л.А., Масандилов Л.Б., Юферов Ф.М., Тун А.Я., Москаленко В.В., Старокожев. А.И., Сошкин, В.П., Рыбальченко Ю.И., Левинтов С.Д., Борисов А.М., Лейтман М.Б., Нестеровский А.В., Столяров И.М., Дартау В.А., Мельников В.Ю., Кибартас В.В., Бородацкий Е.Г., Зигангирова Е.В., Изосимов, Д. Б., Виноградов А.Б., Каширских В.Г., Макаров В.Г., Holtz J., Blaschke F., Okuyama T., Lawrenson P. J., Harris M. R., Peter Vas, Schroder D., Tung-Hai Chin, Matsuse, K., Marchesoni, M., Segarich P., Soressi E. и др.

В большинстве случаев можно проводить контроль механических выходных переменных электропривода непосредственно. В этом случае используются датчики скорости и момента, реализованные на основе дополнительных, встраиваемых в электродвигатель или механически присоединенных к нему микромашин постоянного или переменного тока, а также других специальных устройств. Однако эти устройства имеют достаточно высокую стоимость и сложность, при этом требуется тщательная установка датчиков, а их механическое сочленение с вращающимися частями исполнительного механизма приводит к увеличению массогабаритных показателей и снижению надежности электропривода.

В связи с этим возникает необходимость разработки устройств, использующих косвенный контроль для определения момента и скорости в электроприводе. При этом величина, которую контролируют, определяется косвенно через электрические переменные, определяемые легкодоступным способом.

Использование устройств косвенного контроля в асинхронном электроприводе (АЭП) имеет определенные преимущества:

- конструкция электропривода становится менее сложной;
- уменьшается его стоимость и массогабаритные показатели;

- нет необходимости в идущих от датчика проводах и в ремонте датчиков;
- увеличивается надежность;
- расширяется область применения;
- позволяет осуществлять наблюдение загрузки электродвигателей при изменении данных сети и потребителя;
- позволяет осуществлять контроль выходных координат АЭП с целью наблюдения за технологическим процессом.

На основании вышеизложенного, следует отметить, что большой объем научных работ в данном направлении и тот факт, что интенсивность публикаций не снижается, говорит о том, что вопрос разработки устройств, алгоритмов и способов косвенного контроля выходных механических переменных АД до сих пор окончательно не решен и является актуальным.

Объектом исследования является асинхронный электропривод с устройством косвенного контроля выходных механических переменных АД.

Предметом исследования является асинхронный электродвигатель с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости.

Целью работы является разработка и исследование электропривода с устройством косвенного контроля выходных механических переменных асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

- проведение обзора современного состояния и научно-технических разработок, способов контроля выходных механических переменных асинхронного электродвигателя;
- разработка математического описания асинхронного электродвигателя с устройством косвенного контроля выходных механических переменных, пригодного для обоснования на его основе способов контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;

- получение аналитических зависимостей, позволяющих повысить точность контроля электромагнитного момента и угловой скорости, а также упростить математическое описание асинхронного двигателя с устройством косвенного контроля и их схемную реализацию;

- разработка алгоритмов и способов косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД в ЭП;

- разработка имитационных моделей частотно-управляемого электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором для исследования его динамических характеристик;

- экспериментальное исследование на макетном образце частотно-управляемого электропривода с устройством косвенного контроля выходных механических переменных в лабораторных условиях с целью проверки адекватности математических моделей и результатов теоретических исследований.

Методы исследования. При выполнении работы использовались аналитические, математические и экспериментальные методы исследования. В процессе аналитических и математических исследований использовались методы интегрального, дифференциального и операционного исчисления, а также методы математического и компьютерного моделирования

Численное решение разработанных математических уравнений и их моделирование было выполнено в программном пакете Matlab. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном стенде с использованием методов контроля, измерения и обработки результатов. Для проведения экспериментальных исследований использовалась программная среда Mex Bios со встроенным набором сервисов для управления электродвигателями.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием сопоставленных результатов теоретических исследований с результатами имитационного моделирования на ЭВМ и результатами, полученными

экспериментальным путем, а также соответствием полученных результатов диссертационной работы с положениями теории электрических машин и электропривода.

На защиту выносятся:

- новые математические модели асинхронного двигателя с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости в электроприводе;
- аналитические зависимости асинхронного двигателя с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости, позволяющие проводить непрерывный контроль этих переменных в электроприводе с заданной точностью;
- алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя, в том числе и технические решения, защищенные 2 свидетельствами об официальной регистрации программ на ЭВМ, патентом на изобретение и 2 патентами на полезную модель;
- результаты исследований, полученные на основе разработанных имитационных моделей и экспериментально на лабораторном стенде.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель асинхронного двигателя с устройством косвенного контроля выходных механических переменных, обеспечивающая контроль электромагнитного момента и угловой скорости в электроприводе и отличающаяся от известных, введением в математическое описание дополнительных переменных, учитывающих температуру проводников обмотки статора, частоту основной гармоники напряжения статора и температурный коэффициент, зависящий от материала проводника;
- предложены аналитические зависимости АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости, позволяющие упростить расчет их значений и проводить непрерывный контроль этих переменных;

– разработаны алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя, отличающиеся от известных повышенной точностью контроля значений момента и угловой скорости в динамических режимах работы электропривода и простотой реализации.

Практическая ценность работы состоит в разработке устройства косвенного контроля выходных механических переменных асинхронного двигателя для электроприводов общепромышленных механизмов, которое обладает новыми техническими решениями, защищенные патентами РФ и РК, позволяющее реализовать непрерывный контроль за изменением выходных механических переменных с целью поддержания и регулирования выходных параметров технологического процесса и раннего прогнозирования аварийных отключений электропривода по причине возникновения неисправностей со стороны асинхронного двигателя. Кроме того, разработанные имитационные модели АД с устройством косвенного контроля переменных позволяют проводить исследование асинхронных электроприводов имитационным путем без создания дорогостоящей физической модели.

Реализация результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований переданы для внедрения на ООО «Эле Тим» (Россия, г. Томск), ТОО «КФ КОТЭС» (Казахстан, г. Павлодар), а также используются в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных работ студентами кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ и студентами департамента «Энергетика и Металлургия» Инновационного Евразийского Университета (Казахстан), что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы и перспективы применения чистых технологий для устойчивого развития регионов», Павлодар, 2005; Международная научно-практическая конференция

«Наука и образование в XXI веке: динамика развития в Евразийском пространстве», Павлодар, 2006; Международная научно-практическая конференция «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт», Омск, 2007; Международная научно-практическая конференция «Энерго-, ресурсосберегающие технологии – основа индустриально-инновационного развития», Павлодар, 2008; Международная научно-практическая конференция «Life IT 2009: IT meets environmental and sustainable energy technologies», Hagen, Германия, 2009; Международная научно-практическая конференция «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы», Павлодар, 2009; на Региональная научно-техническая конференция «Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве», Омск, 2010; XVI, XVII Всероссийские научно-практические конференции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность», Томск, 2010–2011; II Международная научно-практическая конференция «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве», Павлодар, 2011; XI Международная научно-практическая конференция «Проблемы и достижения в промышленной энергетике», Екатеринбург, 2012; XIX Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2013; II Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, 2014; IX Международная научно-практическая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», Омск, 2014; Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи «Sibcon», Омск, 2015 [22 – 33, 57, 60, 61, 64 – 67, 70 – 72, 94 – 97, 103].

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 28 работах. Из них 5 статей в изданиях из перечня, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в базе Scopus, 2 патента РФ на полезную модель, 1 патент РФ на изобретение, 3 свидетельства на программный продукт, 2 предварительных патента Республики Казахстан, 2 инновационных патента Республики Казахстан, 13 статей в сборниках докладов Международных и Всероссийских конференций.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 116 страниц машинописного текста, включая 61 рисунок, 4 таблицы, списка использованной литературы из 117 наименований и приложения на 4 страницах.

Работа выполнена в рамках гранта программы «Болашак» и ВИУ_ЭНИН_138_2014.

Автор выражает искреннюю и глубокую признательность за неоценимую помощь и ценные советы, оказанные при подготовке и выполнении исследований диссертационной работы, коллективу кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета, особенно к.т.н. Л.С. Удуту, Г.В. Радионову.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории «Микропроцессорные системы управления электроприводом» за поддержку и неоценимую помощь при проведении экспериментальных исследований на лабораторном стенде.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.т.н. Ю.Н. Дементьеву за любезно предоставленную возможность выполнить данную работу под его руководством на кафедре электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета, ценные советы и помощь на всех этапах выполнения данной работы.

Отдельную благодарность автор выражает своим родным и близким за понимание и поддержку на протяжении всего периода работы над диссертацией.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК, СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1.1 Необходимость косвенного контроля переменных асинхронного электропривода в технологических процессах

При анализе современных асинхронных электроприводов в технологическом процессе, например, при транспортировке жидкости для водоснабжения и канализации населенных пунктов и промышленных предприятий [1, 39, 52], перемещения нефти и нефтепродуктов от месторождений к перерабатывающим предприятиям [14] и т.д., часто возникает необходимость контроля механических выходных переменных АЭП.

Функциональная схема технологического процесса транспортировки жидкости СПЖ с последовательно соединенными центробежными насосными установками представлена на рисунке 1.1.

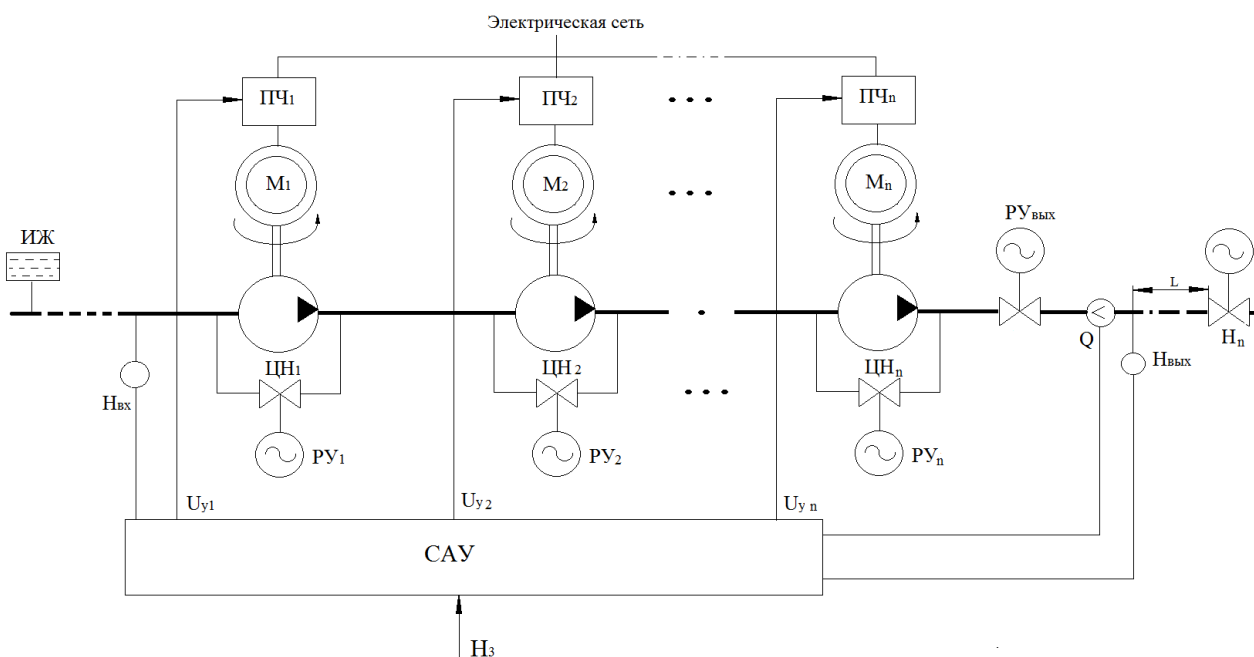


Рисунок 1.1. Функциональная схема СПЖ с индивидуальными ПЧ

СПЖ – важная составляющая системы транспортировки жидких сред - является сложной технологической и энергетической системой [9].

СПЖ обеспечивают следующие функции:

- график подачи жидкости для нормальных и аварийных условий;
- затраты на сооружение, оснащение и эксплуатацию СПЖ;
- требуемую степень надежности и, следовательно, определенную степень бесперебойности работы;
- долговечность, соответствующую технологической значимости объектов, в состав которых СПЖ входят;
- достаточные условия эксплуатации (широкое применение автоматики и телемеханики);
- состав сооружений и оборудования, равно как вся система гидротранспорта, должны отвечать условиям будущей эксплуатации при непрерывно меняющихся размерах и режиме потребления жидкости. [1].

Насосная установка состоит обычно из нескольких насосов, соединенных между собой последовательно или параллельно.

При механическом регулировании для обеспечения изменения количества энергии требуется дополнительно введение заслонки в выходной трубопровод. Такое регулирование является нерациональным по использованию электрической энергии, полученной из сети.

Электрическое регулирование можно осуществить, применяя регулируемый электропривод, и увеличить при этом эффективность использования энергии.

Основными технологическими параметрами СПЖ являются расход и напор жидкости, причем СПЖ должна поддерживать напор на определенном уровне, а гидравлический потребитель управляет расходом жидкости.

На функциональной схеме СПЖ с n последовательно соединенными центробежными насосными установками ($ЦН_i$) обозначено H_i – напор i -й насосной установки ($i = 1, 2, \dots, n$), Q_i – подача или расход жидкости i -й насосной установки ($i = 1, 2, \dots, n$), L – расстояние [9].

Транспортирование жидкости в выходной трубопровод на расстояние L осуществляется от источника жидкости (ИЖ). В качестве ИЖ может быть приемный резервуар, другая СПЖ и т.д.

Каждый из насосов приводится во вращение асинхронным электродвигателем (M_i), который получает питание от преобразователя частоты ($ПЧ_i$).

Система автоматического управления осуществляет управление напором насосных агрегатов. С помощью регулирующих устройств ($РУ_i$) происходит подключение установок к трубопроводу или отключение. На рисунке 1.1. при совместной последовательной работе насосных агрегатов из электрической сети потребляется энергия, которая необходима потоку жидкости требуемого запаса кинетической энергии и покрытия потерь в ПЧ, электродвигателях, насосных установках и в выходном регулирующем устройстве. При этом напор на выходе СПЖ складывается из напоров, развиваемых каждым насосом при одинаковой подаче жидкости. [1, 14, 39, 52].

Схемы СПЖ с группой ПЧ имеют высокую стоимость и сложность применяемого оборудования, выполненного на полную мощность электродвигателя, что является основным недостатком использования регулируемых насосных установок, представленных на рисунке 1.1.

Так как до сих пор подавляющее большинство асинхронных ЭП общепромышленных механизмов являются нерегулируемыми или оснащены малоэффективными как с энергетической, так и с технологической точки зрения системами управления, то для совершенствования их потребительских характеристик и характеристик технологического процесса необходимо применять упрощенную схему управления СПЖ с устройством косвенного контроля.

Наиболее оптимальным является использование функциональной схемы, приведенной на рисунке 1.2, в которой для контроля механических выходных переменных АД при нормальном режиме работы или при выходе преобразователя

частоты из строя используют устройство косвенного контроля выходных механических переменных АД (УКК).

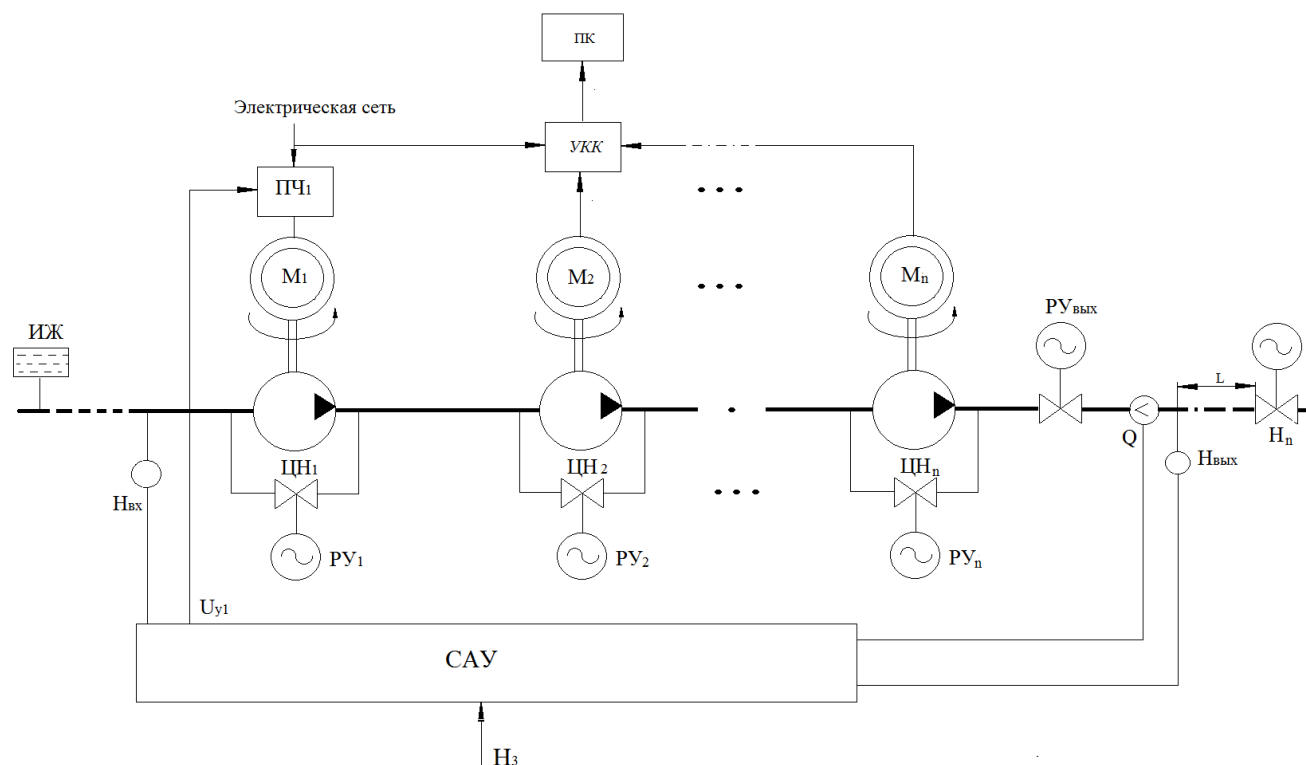


Рисунок 1.2. Функциональная схема СПЖ с одним ПЧ

С помощью УКК возможно проводить мониторинг загрузки двигателей, иметь информацию о технологических параметрах механизмов и поддерживать скорость в заданных пределах.

Таким образом, в системах транспортировки жидких сред, представленной функциональной схемой на рисунке 1.2, с целью непрерывного контроля выходных механических переменных АД насосных агрегатов и поддержания технологических параметров СПЖ в заданных пределах, а также мониторинга состояния загрузки АД целесообразно применять УКК.

1.2 Способы контроля выходных переменных асинхронного двигателя в электроприводе

Современный асинхронный электропривод общепромышленных механизмов занимает лидирующее положение во всех отраслях промышленности.

Обеспечение необходимых параметров современного технологического процесса добивается регулированием частоты вращения приводных двигателей с достаточно высокой статической и динамической точностью.

Движение рабочего органа производственных механизмов при различных технологических режимах работы требуют различного значения и скорости, что можно обеспечить механически или электрическим регулированием электропривода, причем требования, предъявляемые к диапазону и точности регулирования скорости, изменяются в довольно широких пределах в зависимости от области применения электропривода.

В приводах конвейеров, транспортеров, дозаторов, подъемных механизмов, при транспортировке жидкости для водоснабжения и канализации населенных пунктов и промышленных предприятий [1, 39, 52], перемещения нефти и нефтепродуктов от месторождений к перерабатывающим предприятиям [14] и т.д. требуется реализация быстродействующего управления электромагнитным моментом двигателя и необходим контроль скорости перемещения и развиваемом усилии, при этом особый интерес в мировой практике приобретает вопрос эффективного управления асинхронными электродвигателями.

Наиболее распространенными в большинстве случаев в качестве устройств измерения скорости служат импульсные и тахогенераторные датчики [53, 58, 94, 95, 104], балансирные и трансмиссионные динамометры, торсионные приборы, преобразовательные установки для измерения момента [51, 53, 60, 64, 85, 89, 95]. Эти устройства могут быть реализованы на основе дополнительных, встраиваемых в электродвигатель или механически присоединенных к нему микромашин постоянного или переменного тока, а также других специальных устройств. Эти датчики позволяют контролировать механические переменные

электропривода с необходимой точностью, но имеют сложность конструкции и требуют тщательной установки датчиков для их сопряжения с вращающимися частями электропривода, что приводит к невысокой надежности в работе.

Необходимо отметить, что применение датчиков скорости вращения ротора позволяет получить качественное и сравнительно простое управление асинхронным двигателем. Однако наличие этих датчиков существенно ухудшает эксплуатационные характеристики электропривода, а их использование может быть невозможным по условиям функционирования электропривода.

В связи с этим промышленными предприятиями широко востребованы устройства и методы, позволяющие проводить мониторинг загруженности двигателей, параметров общепромышленных механизмов технологического процесса и поддерживать скорость в заданных пределах при отсутствии датчиков скорости и момента, когда необходимая информация вычисляется косвенными методами. Обычно задачу косвенного определения выходных переменных электродвигателя целесообразно решать параллельно с задачей идентификации параметров.

На рисунке 1.2.1 схематично представлена возможная общая классификация методов контроля выходных механических переменных электродвигателя.

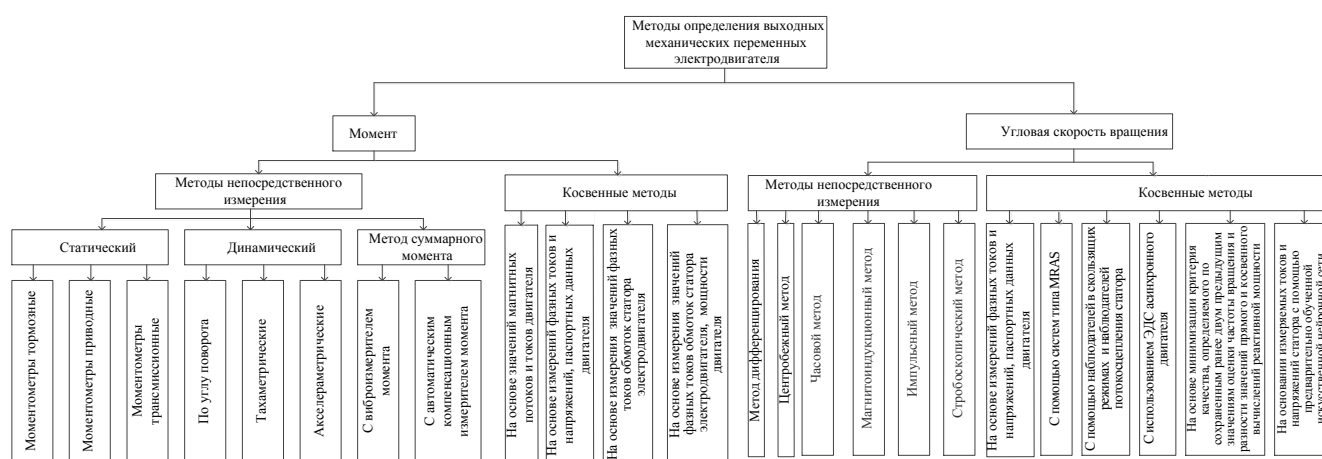


Рисунок 1.2.1 Общая классификация методов контроля выходных механических переменных электродвигателя

На сегодняшний день существует большое количество публикаций, которые предлагают методы решения задач идентификации параметров и переменных величин двигателей, а также технических решений для их реализации.

В работе [44] приведены методы идентификации: на основе методов оценивания; на основе поисковых методов и искусственных нейронных сетей; предварительной идентификации параметров.

Используя метод наименьших квадратов и фильтр Калмана с применением уравнений динамики обобщённой электрической машины, осуществляется идентификация асинхронного двигателя на основе методов оценивания его параметров и переменных состояния в реальном времени, а информация о процессах в электродвигателе получается исходя из измерения текущих значений фазных токов и напряжений статора, кроме того, в установившемся режиме необходимо также измерение частоты вращения ротора [44].

Невысокие требования к вычислительным ресурсам и возможность нахождения оценок параметров и переменных состояния электродвигателя в реальном времени при минимальном наборе измерительной информации являются достоинствами приведённых методов.

В работах [55–57] предлагается осуществлять идентификацию параметров применением непрерывного градиентного метода поиска минимума функции к идентификации параметров асинхронного двигателя; идентификацию данных трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с использованием градиентного метода поиска минимума функции, с помощью устройства оценивания параметров асинхронного двигателя, которое контролирует активные сопротивления и индуктивности фаз обмоток статора и ротора, взаимную индуктивность, момент инерции, статический момент и токи короткозамкнутого ротора.

В установках, работающих в химических, взрывоопасных, пожароопасных и радиоактивных средах, в условиях повышенных вибраций и ударных механических нагрузок получили широкое распространение двигатели без датчиков механических переменных.

В рамках указанного направления развития электропривода ведутся исследования и разрабатываются методы бездатчикового определения скорости, позволяющие осуществлять оценку скорости косвенно, используя доступные измерению электрические переменные. При таком подходе функции вращающегося датчика передаются электронной части системы. Это ведет к ее усложнению, однако выполнение системы управления на микропроцессорной основе не приводит к существенному удорожанию привода. Следует отметить, что при этом отпадает необходимость в проводах, соединяющих датчик скорости с системой управления, которая может находиться на значительном расстоянии от двигателя и датчика.

Использование методов, сложность которых определяется требуемым диапазоном регулирования привода и требованиями к точности измерения скорости может применяться при нахождении скорости без датчика [87]. В [116] методы определения скорости асинхронного двигателя классифицируются на пять групп.

Первую группу составляют методы, в которых определяют скорости через рассчитываемые в схеме частоты напряжения питания и роторной ЭДС или непосредственно через измеряемые напряжение и ток статора определяют скорость. Ко второй группе относятся адаптивные методы, ориентированные на замкнутые системы регулирования ЭП и применения адаптации для повышения точности измерений. Третью группу составляют методы, в которых учитывают конструктивные особенности двигателя и используют дополнительную информацию, связанную с особенностями машины. Нелинейные методы, которые базируются на теории нейронных цепей относятся к четвертой группе. Пятая группа – методы, в которой применяют для повышения точности дополнительные высокочастотные сигналы или другую дополнительную информацию.

Математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат – основа принципа построения схем определения скорости без датчика. С помощью величин, записанных во вращающейся системе координат, в

неподвижной системе координат, в неподвижной и во вращающейся системах координат возможно произвести расчет скорости.

Способ оптимальной оценки частоты вращения асинхронного двигателя и система для его реализации представлен в [10]. На основании измеряемых текущих значений напряжений и токов статора двигателя осуществляется оценка частоты вращения, проводится прямое и косвенное вычисление значений реактивной мощности, пропорционально-интегральное преобразование на основе минимизации критерия качества, определяемого по сохраненным ранее двум предыдущим значениям оценки частоты вращения и разности значений прямого и косвенного вычислений реактивной мощности.

Способ определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя предложен в работе [16], который осуществляется на основании измеряемых мгновенных величин токов и напряжений статора асинхронного двигателя с помощью предварительно обученной искусственной нейронной сети.

Существует довольно простой метод, в котором на основании [109] с использованием ЭДС асинхронного двигателя определяют значение угловой скорости.

В работах [39, 111] применяются наблюдатели в скользящих режимах и наблюдатели потокосцепления статора, с помощью которых вычисляется скорость ротора электродвигателя. Эти методы являются с одной стороны более точными, а с другой стороны сложными.

Системы типа MRAS [111, 114] широко распространены для оценивания скорости ротора электродвигателя. В этих системах используют векторное уравнение потокосцепления ротора, которое является базовой моделью и второе уравнение настраиваемой моделью, при этом в [111], базовая модель – это сам асинхронный двигатель, а настраиваемая модель – наблюдатель тока статора и потокосцепления ротора.

Все рассмотренные выше методы чувствительны к изменениям параметров магнитной цепи асинхронного двигателя.

Известно устройство измерения частоты вращения асинхронного электродвигателя, в котором используются известные параметры и измеренные

значения токов и напряжений для получения искомого значения частоты вращения [7, 8], но оно не позволяет измерять скорость двигателя при переменной частоте питающего напряжения (тока) и имеет высокую погрешность измерений в переходных режимах работы электропривода, т.к. в основу его работы положено математическое описание асинхронного электродвигателя в установившемся режиме работы.

Одной из наиболее важных и в тоже время трудно измеряемых величин, характеризующих работу электромеханических систем, является вращающий момент электродвигателя.

Измерение этого момента возможно производить различными способами. Одни из них связаны с необходимостью измерения мгновенных значений магнитных потоков и токов двигателей. Перемножая соответствующие токи и потоки, можно получить момент двигателя [7, 8].

При этом используются идеализированные зависимости, которые в ряде случаев могут привести к значительным погрешностям измерений, вследствие чего такой метод не получил широкого распространения.

Для измерения электромагнитных моментов двигателей можно воспользоваться методами, основанными на измерении крутящего момента, передаваемого через вал. Однако для того, чтобы крутящий момент на валу двигателя был близок к его электромагнитному моменту, необходимо присоединить к валу двигателя дополнительную маховую массу, момент инерции.

Известен способ измерения крутящего момента электродвигателя [53], в котором измеряют мгновенные значения фазных токов обмоток статора электродвигателя, реактивную мощность двигателя, по величине которых вычисляют значение тока намагничивания. Недостатком этого способа является снижение точности измерения крутящего момента в динамических режимах работы электропривода из-за некоторой задержки информация о моменте относительно времени измерения фазных токов и реактивной мощности.

В работах [9, 61, 64, 65, 70] разработан способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя, в котором измеряют мгновенные значения

фазных токов обмоток статора электродвигателя, и по этим значениям находят составляющие векторов тока, напряжения, вычисляют ток ротора в двухфазной системе координат. С учетом этих значений рассчитывают величину момента. Этот способ является достаточно сложным по реализации.

Существует метод суммарного момента, основанный на измерении реактивного момента, который действует на статор испытуемого двигателя. В этом случае измеряется вращающий момент, что упрощает конструкцию и в ряде случаев повышается точность измерений. Этот метод позволяет определять вращающие моменты двигателей при установившихся и переходных процессах. Однако вследствие того, что элемент измерительной системы двигателя обладает большим моментом инерции, то для получения необходимых динамических свойств этой системы требуется, чтобы упругие элементы имели повышенную жесткость, а это снижает чувствительность измерительного устройства. Кроме того, этот способ предъявляет дополнительные требования к фундаментам двигателей, поэтому это устройство используется только для двигателей небольшой мощности. Для увеличения чувствительности устройства можно уменьшить жесткость упругих элементов, однако это приводит к ухудшению его динамических свойств и к увеличению погрешности измерений при переходных процессах.

Известен способ измерения электромагнитного момента машин переменного тока, принцип действия которого основан на расчете момента двигателя по измеренным значениям фазных токов и напряжений двигателя, вычисленному потокоцеплению и числу пар полюсов. Основными достоинствами этого способа являются: удобство эксплуатации, связанное с наличием датчиков только электрических величин (токов и напряжений); может быть использован для измерения момента сопротивления на валу двигателей, с небольшими дополнениями – для измерений активной и реактивной мощностей, потребляемых электрическими машинами переменного тока. Основным недостатком является то, что не учитывается влияние моментов от высших пространственных гармоник и потерь в стали [113].

В настоящее время создано большое количество датчиков скорости и момента для асинхронных электродвигателей, которые работают на основе косвенных методов измерения [12, 71, 75 – 77, 81, 90, 91, 107 – 117].

Существуют датчики, которые осуществляют контроль магнитного потока в обмотках или в воздушном зазоре электродвигателя, обеспечивающие получение информации с высокой точностью. Однако в этом случае необходимо встраивание датчиков потока в обмотки или магнитопровод электродвигателя. Например, датчиков Холла, что усложняет конструкцию и схему связи преобразователя с двигателем.

Таким образом, разработка и исследование асинхронного электропривода с устройством косвенного контроля выходных механических переменных АД, например, насосного агрегата СПЖ, позволяет проводить виртуальные и полунатурные исследования, чтобы контролировать выходные переменные, обеспечивая заданные технологические параметры, и является актуальной и востребованной в настоящее время.

1.3. Выводы по главе

Результаты проведенного анализа состояния теоретических исследований и практических разработок способов измерения выходных переменных и параметров АД показали, что:

1. Благодаря простоте, надежности и экономичности в настоящее время асинхронный двигатель общепромышленного исполнения с короткозамкнутым ротором является одним из распространенных исполнительных элементов современного управляемого электропривода общепромышленного назначения, в том числе в системах транспортировки жидких сред.

2. При управлении АД в механизмах общепромышленного назначения, например в СПЖ, целесообразно иметь информацию о выходных механических переменных АД насосного агрегата с целью наблюдения за состоянием напора в СПЖ и осуществления контроля загрузки АД насосов при изменении характеристик сети и потребителя.

3. В связи с широким применением частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями актуальной является задача косвенного определения скорости, которую целесообразно решать параллельно с задачей идентификации параметров асинхронного электродвигателя.

4. Разработка и исследование асинхронного ЭП с устройством косвенного контроля выходных переменных АД позволяет сравнительно простым и достаточно точным способом осуществлять контроль момента и угловой скорости АД для обеспечения требуемых выходных переменных современного технологического процесса.

Исходя из этого, можно сформулировать следующие основные задачи, решаемые в диссертационной работе:

1. Получить аналитические зависимости, которые описывают математические модели ЭП с устройством косвенного контроля выходных механических переменных АД;

2. Разработать алгоритмы и способы косвенного контроля выходных механических переменных АД в ЭП;

3. Разработать имитационные модели косвенного контроля выходных переменных АД в ЭП для исследования механических характеристик ЭП;

4. Оценить адекватность математической модели ЭП с устройством косвенного контроля с помощью экспериментальных исследований на макетном образце с учетом технической реализации.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ, АЛГОРИТМЫ И СПОСОБЫ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1 Математическое описание асинхронного электродвигателя с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости

Наибольшее распространение в задачах анализа различных режимов работы АД и построения систем управления получили модели, построенные на базе математического описания обобщенной электрической машины [4, 5, 13, 17, 18, 21, 40, 42, 43, 45–47, 84–87, 102, 103], потому что они адекватно отражают процессы, происходящие в АД. Другие известные приемы математического описания модели, основанные на уравнениях Максвелла и теории цепей [49, 78, 102, 103, 105], обладают существенными недостатками. Например, для построения модели на базе уравнений Максвелла, необходим учет геометрических данных электрической машины, что является сложным и применяется в основном в задачах проектирования.

Следует подчеркнуть, что, несмотря на полное и строгое математическое описание, использование уравнений [49, 78, 102] при исследовании процессов в АД на практике вызывает определенные трудности, так как выходные механические переменные (момент и его угловая скорость) не могут быть измерены без непосредственного контроля текущих значений потокосцеплений статора и ротора по осям α и β .

Чтобы упростить контроль выходных механических переменных АД целесообразно использовать математическую модель АД, в которой их значения определяются по каталожным данным или идентификацией параметров двигателя и через доступные измерению электрические переменные.

Для математического описания АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости, целесообразно воспользоваться выражениями, приведенными в [59–74].

Основополагающие уравнения для математического описания контроля электромагнитного момента и угловой скорости представлены в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} I'_{\alpha r} = \frac{1}{L_{\mu}} \cdot \int u_a(t) dt - \frac{R_s}{L_{\mu}} \cdot \int i_a(t) dt - \frac{L_s}{L_{\mu}} \cdot i_a(t); \\ I'_{\beta r} = \frac{1}{L_{\mu}} \cdot \int \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_a(t) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot u_b(t) \right) dt - \frac{R_s}{L_{\mu}} \cdot \int \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_a(t) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot i_b(t) \right) dt - \\ - \frac{L_s}{L_{\mu}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_a(t) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot i_b(t) \right); \\ M_{\varepsilon} = \frac{3}{2} \cdot L_{\mu} \cdot p_n \cdot (I_{\alpha s} \cdot I'_{\beta r} - I_{\beta s} \cdot I'_{\alpha r}); \\ \omega = \frac{\frac{L'_r}{L_{\mu}} \cdot U_{\alpha s} - \left(\frac{L'_r \cdot L_s}{L_{\mu}} - L_{\mu} \right) \cdot \frac{dI_{\alpha s}}{dt} - \frac{L'_r \cdot R_s}{L_{\mu}} \cdot I_{\alpha s} + R'_r \cdot I'_{\alpha r}}{-(L'_r \cdot I'_{\beta r} + L_{\mu} \cdot I_{\beta s})} \end{array} \right. .$$

где $U_{\alpha s}, U_{\beta s}, I_{\alpha s}, I_{\beta s}, I'_{\alpha r}, I'_{\beta r}$ – соответственно напряжения и токи в обмотках статора и ротора по оси α и β ;

i_a, i_b, u_a, u_b – токи и напряжения соответственно фаз А и В обмотки статора;

R_s, R'_r – активные сопротивления обмотки статора и приведенное ротора;

L_s – полная индуктивность обмотки статора;

L'_r – приведенная полная индуктивность обмотки ротора;

L_{μ} – взаимная индуктивность обмотки статора и ротора;

p_n – число пар полюсов двигателя.

Выполнив некоторые преобразования, можно получить выражение для расчета угловой скорости вращения

$$\omega = \frac{\sqrt{3} \cdot L'_r \cdot [u_a(t) - (R_s + \frac{R'_r \cdot L_s}{L'_r}) \cdot i_a(t)]}{L'_r \cdot (\int (R_s \cdot (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t)))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t)))} +$$

$$+ \frac{\sqrt{3} \cdot L'_r \cdot [\frac{R'_r}{L'_r} \cdot \int (u_a(t) - R_s \cdot i_a(t))dt + (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot \frac{di_a(t)}{dt}]}{L'_r (\int (R_s (i_a + 2i_b) - (u_a + 2u_b))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot (i_a + 2i_b))}.$$

Разделив числитель и знаменатель на приведенную индуктивность обмотки ротора, получим выражение для определения угловой скорости АД

$$\omega = \frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_s + \frac{R'_r \cdot L_s}{L'_r}) \cdot i_a(t)]}{\int (R_s (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t)))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} +$$

$$+ \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{R'_r}{L'_r} \cdot \int (u_a(t) - R_s \cdot i_a(t))dt}{\int (R_s (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t)))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} +$$

$$+ \frac{\sqrt{3} \cdot (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot \frac{di_a(t)}{dt}}{\int (R_s (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t)))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_s) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))}.$$

Для упрощения уравнения расчета угловой скорости вращения введем следующие обозначения:

$$T'_r = \frac{L'_r}{R'_r} - \text{постоянная времени ротора};$$

$R'_r \alpha = R'_r \cdot \alpha$ – активное приведенное сопротивление обмотки ротора с учетом коэффициента α ;

$\alpha = \frac{L_S}{L'_r}$ – коэффициент, равный отношению полной индуктивности обмотки статора L_S к приведенной полной индуктивности обмотки ротора L'_r ;

$\beta = \frac{L_\mu}{L'_r}$ – коэффициент, равный отношению взаимной индуктивности L_μ к приведенной полной индуктивности обмотки ротора L'_r ;

$L_\beta = L_\mu \cdot \beta - L_S$ – индуктивность с учетом коэффициента β ;

и получим следующие выражения

$$\omega_{\text{и}}(t) = \frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_S + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}{\int (R_S \cdot [i_a(t) + 2 \cdot i_b(t)] - [u_a(t) + 2 \cdot u_b(t)]) dt - L_\beta \cdot [i_a(t) + i_b(t)]} -$$

измеренное мгновенное значение угловой скорости;

$$\Delta \omega_{\text{инт}}(t) = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \left[\frac{R'_r}{L'_r} \cdot \int (u_a(t) - R_S \cdot i_a(t)) dt \right]}{\int (R_S (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t))) dt - \left(\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S \right) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} \right) \cdot$$

$$\cdot \omega_{\text{и}}^{-1}(t) = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \left[\frac{R'_r}{L'_r} \cdot \int (u_a(t) - R_S \cdot i_a(t)) dt \right]}{\int (R_S (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t))) dt - \left(\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S \right) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} \right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_S + \frac{R'_r \cdot L_S}{L'_r}) \cdot i_a(t)]}{\int (R_S(i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t)))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{\int (u_a(t) - R_S \cdot i_a(t))dt}{T'_r(u_a(t) - (R_S + \frac{L_S}{T'_r})i_a(t))};$$

$$\Delta \omega_{\text{инт}}(t) = \frac{\int [u_a(t) - R_S \cdot i_a(t)]dt}{T'_r \cdot [u_a(t) - (R_S + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]} - \text{динамическая интегральная}$$

составляющая относительного значения угловой скорости;

$$\Delta \omega_{\text{диф}}(t) = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S) \frac{di_a(t)}{dt}}{R_S \cdot \int (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t))dt - (L_S - \frac{L_\mu^2}{L'_r}) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} \right) \cdot$$

$$\cdot \omega_{\text{и}}^{-1}(t) = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S) \cdot \frac{di_a(t)}{dt}}{R_S \cdot \int (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t))dt - (L_S - \frac{L_\mu^2}{L'_r}) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} \right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_S + \frac{R'_r \cdot L_S}{L'_r}) \cdot i_a(t)]}{\int (R_S \cdot (i_a(t) + 2i_b(t)) - (u_a(t) + 2u_b(t)))dt - (\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S) \cdot (i_a(t) + 2i_b(t))} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{(\frac{L_\mu^2}{L'_r} - L_S) \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (R_S + \frac{L_S}{T'_r}) \cdot i_a(t)}.$$

$$\Delta\omega_{\text{диф}}(t) = \frac{L\beta \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (R_s + R'_r\alpha) \cdot i_a(t)} \quad - \quad \text{динамическая}$$

дифференциальная составляющая относительного значения угловой скорости.

Окончательно уравнение угловой скорости АД с устройством косвенного контроля может быть представлено в следующем виде

$$\omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) \cdot \left[1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t) \right].$$

Таким образом, по вышеприведенным уравнениям можно определить выходные механические переменные АД путем измерения напряжений, токов фаз статора и паспортных данных электродвигателя для контроля их текущих значений, а математическая модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости может быть описана следующей системой уравнений [25–27, 96, 97, 106].

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[i_a(t) \cdot \int [u_b(t) - R_s \cdot i_b(t)] dt - i_b(t) \cdot \int [u_a(t) - R_s \cdot i_a(t)] dt \right] \\ \omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) \cdot \left[1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t) \right], \end{cases} \quad (2.1.1)$$

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[i_a(t) \cdot \int_0^{1/f} [u_b(t) - z \cdot i_b(t)] dt - i_b(t) \cdot \int_0^{1/f} [u_a(t) - z \cdot i_a(t)] dt \right] \\ \omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) \cdot \left[1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t) \right] \end{cases} \quad (2.1.2)$$

где f – частота основной гармоники напряжения питания асинхронного электродвигателя;

$z = R_S \cdot [1 + \alpha_t \cdot (t_{\text{пр}} - 20)]$ – активное сопротивление обмотки статора с учетом температурного коэффициента α_t ;

α_t – температурный коэффициент, характеризующий свойства проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя;

$t_{\text{пр}}$ – температура проводников обмотки статора асинхронного электродвигателя;

$$\omega_{\text{и}}(t) = \frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (z + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}{\frac{1}{f} \int_0^t [(z \cdot i_a(t) + 2 \cdot i_b(t)) - [u_a(t) + 2 \cdot u_b(t)]] dt - L_\beta \cdot [i_a(t) + i_b(t)]} \quad -$$

измеренное мгновенное значение угловой скорости;

$$\Delta\omega_{\text{инт}}(t) = \frac{\frac{1}{f} \int_0^t [u_a(t) - z \cdot i_a(t)] dt}{T'_r \cdot [u_a(t) - (z + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]} \quad - \text{динамическая интегральная}$$

составляющая относительного значения угловой скорости;

$$\Delta\omega_{\text{диф}}(t) = \frac{L_\beta \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (z + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)} \quad - \text{динамическая}$$

дифференциальная составляющая относительного значения угловой скорости.

В математической модели (2.1.2) в отличие от предыдущей модели (2.1.1) для повышения точности контроля выходных переменных АД вводятся дополнительные переменные, позволяющие учитывать изменение температуры проводников обмотки статора, колебания частоты основной гармоники напряжения статора, а также постоянный температурный коэффициент, зависящий от материала проводника.

Наличие интегральных составляющих, имеющих в выражениях (2.1.1) и (2.1.2) приводит к появлению погрешностей при контроле токов и напряжений в реальной системе, что может привести к накоплению ошибки при определении электромагнитного момента и угловой скорости. [77]

Поэтому для расчета интегральных составляющих параметров устройства используем известные математические модели аналитических сигналов вида

$$u_a(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) + j \cdot \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k),$$

Тогда

$$\begin{aligned} \int_0^{1/f} [u_a(t) - z \cdot i_a(t)] dt &= \int_0^{1/f} \tilde{U}_a(t) dt = \\ &= \int_0^{1/f} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot (\sin k\omega^* t + \varphi_k^* + j \cdot \cos k\omega^{**} t + j \cdot \varphi_k^{**}) \right\} dt - \\ &- \int_0^{1/f} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} B_k \cdot \sin k\omega^{**} t + \varphi_k^{**} + j \cdot \cos k\omega_k^{**} t + \varphi_k^{**} \right\} dt. \end{aligned}$$

Используя формулы Эйлера можно перейти от тригонометрических функций к показательным [3, 11, 19, 20, 36, 50, 79, 93].

Тогда в общем виде получим, что подынтегральная функция примет вид

$$\tilde{U}_a(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k \cdot e^{\frac{j\pi kt}{l}},$$

где коэффициент

$$C_k = \frac{1}{2l} \int_{-l}^l u(t) e^{-\frac{j\pi kt}{l}} dt,$$

Т.е. гармоники вида $e^{j\pi kt}$ дают спектр волновых чисел с амплитудой

$$C_k = \frac{1}{2l} \int_{-l}^l u(t) e^{-\frac{j\pi kt}{l}} dt.$$

Далее можно использовать преобразование Фурье.

Для сигнала

$$\tilde{U}_a(t) = u(t) \cdot e^{jkt\pi}.$$

$$k = -\frac{\pi}{l}.$$

Преобразование Фурье имеет вид

$$\tilde{U}(j\omega) = u \int_0^{\infty} e^{-(a+j\omega)t} dt = \frac{u}{a+j\omega} = u(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}.$$

Так как функция определена только для $t > 0$, то можно использовать также синус и косинус преобразования Фурье.

Приближение интеграла Фурье дают обычно в виде

$$\begin{aligned} u(t) &\approx \int_0^N (a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t) d\omega = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} (C_k e^{-kt\omega} + C_{-k} e^{kt\omega}) = \sum_{k=0}^{\infty} -C_k^* \sin \omega t. \end{aligned}$$

Таким образом, получим, что интегральная составляющая переходит в свою ортогональную пару, представляющую сумму ряда.

Расчета коэффициентов ряда C_k определим по формуле [36, 93].

$$C_k = \frac{1}{2l} \int_{-l}^l u(t) e^{-\frac{j\pi kt}{l}} dt,$$

Используя формулы Парсеваля и обращения получим

$$f(t) = e^{-\frac{j\pi kt}{l}}, \text{ обозначим } -\frac{j\pi kt}{l} = a,$$

$$\text{То } f(t) = e^{-at},$$

$$u(t) = \frac{1}{a+j\omega} = u(\omega) \cdot e^{-j\varphi(t)}.$$

$$g(t)=1, \quad x=x^0=1, \quad \nu=1$$

$$\int_{+0}^l u(t) \cdot e^{-at} dt = \frac{2^0 \cdot \Gamma(0 + \frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \cdot (a^2 + 1)^{0 + \frac{1}{2}}} = \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \cdot (a^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}.$$

$$C_k = \frac{1}{2l} \cdot \frac{\Gamma(\frac{1}{2}) \cdot l}{\sqrt{\pi} \cdot (\pi^2 j^2 k^2 + l^2)} = \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{2\sqrt{\pi} \cdot (\pi^2 j^2 k^2 + l^2)}.$$

$$k = -\frac{\pi}{l}; \quad l=1; \quad t=1; k=-\pi.$$

$$\begin{aligned} M(t) &= \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[i_a(t) \cdot \int [u_b(t) - R_s \cdot i_b(t)] dt - i_b(t) \cdot \int [u_a(t) - R_s \cdot i_a(t)] dt \right] = \\ &= \sqrt{3} \cdot p_n \cdot i_a(t) \cdot \left\{ \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \cdot (\pi^2 j^2 \pi^2 + 1^2)^{1/2}} - R_s \cdot \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \cdot (\pi^2 j^2 \pi^2 + 1^2)} \right\} - \\ &- i_b(t) \cdot \left\{ \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \frac{\pi^4}{4}}} - R_s \cdot \frac{\Gamma(\frac{1}{2})}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \frac{\pi^4}{4}}} \right\} = \\ &= \sqrt{3} \cdot p_n \cdot i_a(t) \cdot \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \pi^4}} - R_s \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \pi^4}} \right\} - \\ &- i_b(t) \cdot \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \frac{\pi^4}{4}}} - R_s \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 - \frac{\pi^4}{4}}} \right\} = \\ &= \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left(i_a(t) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \pi^4}} - R_s \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \pi^4}} \right) - i_b(t) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{4 - \pi^4}} - R_s \cdot \frac{1}{\sqrt{4 - \pi^4}} \right) \right) = \\ &= \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[(1 - R_s) \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ 2 \cdot i_b(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} - i_a(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 1}} \right\} \right]. \end{aligned}$$

Для $\omega_H(t)$

$$\begin{aligned} & \int (R_s \cdot [i_a(t) + 2 \cdot i_b(t)] - [u_a(t) + 2 \cdot u_b(t)]) dt = \\ & = (R_s - 1) \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \pi^4}} - \frac{2}{\sqrt{4 - \pi^4}} \right\} = (R_s - 1) \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} \\ \omega_{\text{И}}(t) &= \frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}{(R_s - 1) \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} - L_\beta \cdot [i_a(t) + i_b(t)]}. \end{aligned}$$

Для $\Delta\omega_{\text{ИНТ}}(t)$

$$\begin{aligned} \int [u_a(t) - R_s \cdot i_a(t)] dt &= \frac{1}{\sqrt{1 - \pi^4}} - \frac{2R_s}{\sqrt{4 - \pi^4}} = e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{2R_s}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} \\ \Delta\omega_{\text{ИНТ}}(t) &= \frac{e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{2R_s}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\}}{T_r' \cdot [u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}. \end{aligned}$$

Таким образом, представленные ниже уравнения электромагнитного момента и угловой скорости можно использовать для математического описания АД с устройством косвенного контроля.

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[(1 - R_s) \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ 2 \cdot i_b(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} - i_a(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 1}} \right\} \right], \\ \omega(t) = \omega_{\text{И}}(t) \cdot [1 + \Delta\omega_{\text{ИНТ}}(t) + \Delta\omega_{\text{ДИФ}}(t)] \end{cases}, (2.1.3)$$

где

$$\begin{aligned} \omega_{\text{И}}(t) &= \frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}{(R_s - 1) \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} - L_\beta \cdot [i_a(t) + i_b(t)]}; \\ \Delta\omega_{\text{ИНТ}}(t) &= \frac{e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{2R_s}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\}}{T_r' \cdot [u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}; \\ \Delta\omega_{\text{ДИФ}}(t) &= \frac{L_\beta \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)}. \end{aligned}$$

2.2 Алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя

Контроль электромагнитного момента и угловой скорости АД возможно осуществлять по известным паспортным данным двигателя и легко измеряемым величинам – фазным токам (i_a , i_b) и напряжениям (u_a , u_b) [22, 32, 98–100].

В соответствии с системой уравнений (2.1.1) построена обобщенная функциональная схема косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД, представленная на рисунке 2.2.1

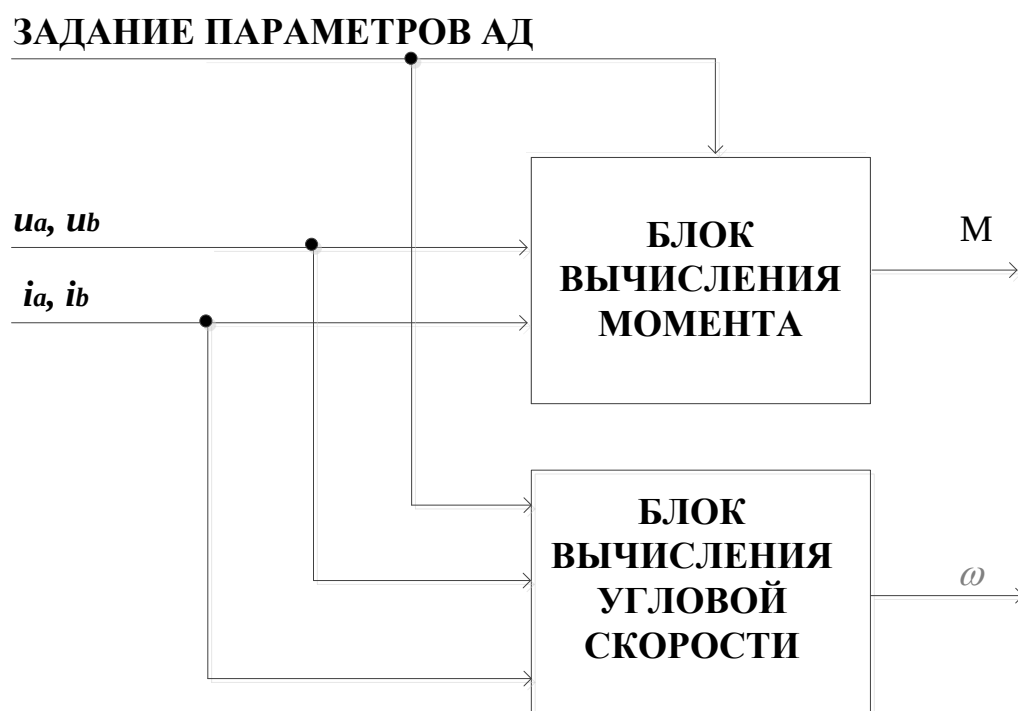


Рисунок 2.2.1 Обобщенная функциональная схема контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

На рисунке 2.2.2 представлен алгоритм определения выходных механических переменных АД.

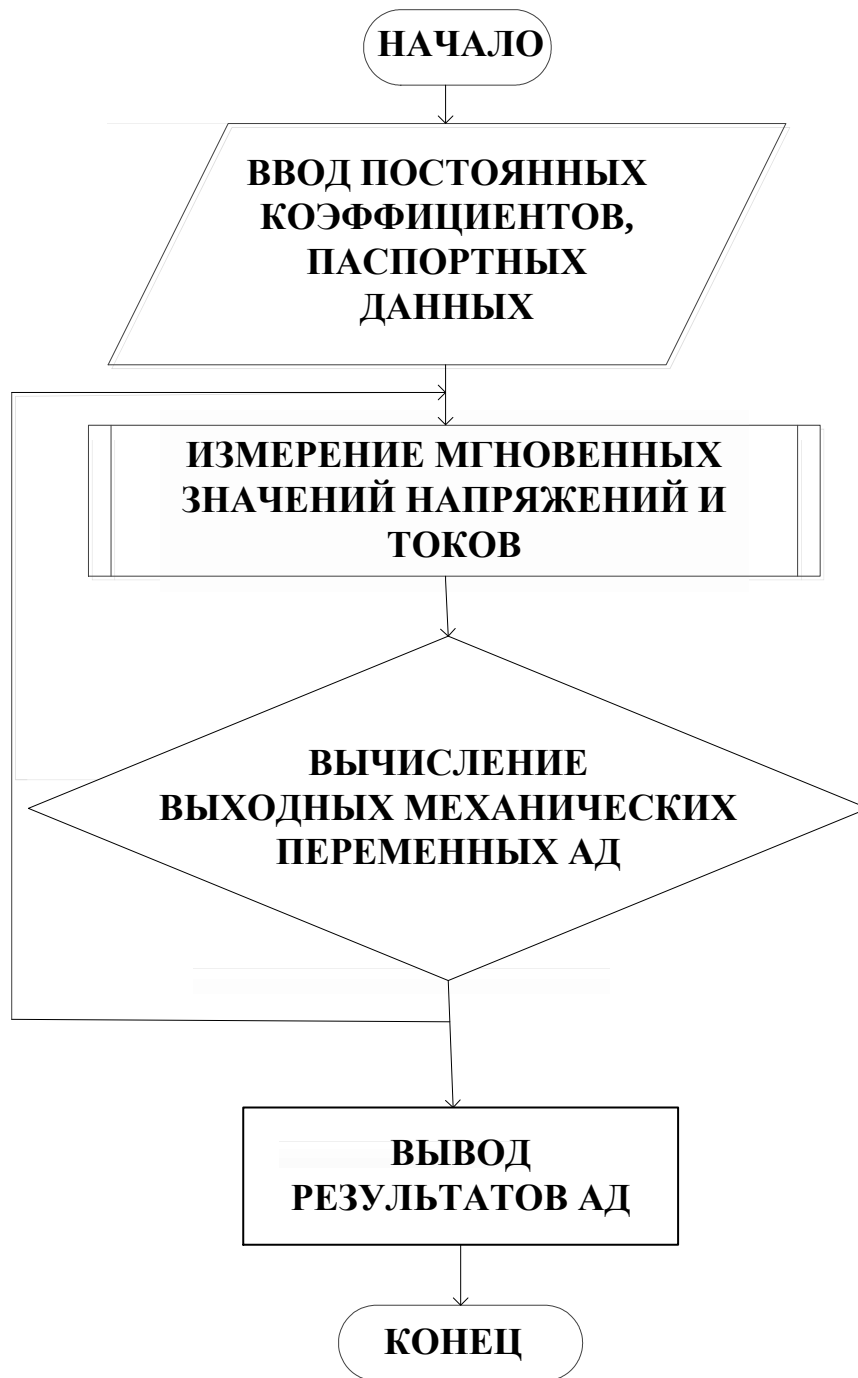


Рисунок 2.2.2 Алгоритм косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

В соответствии с рассматриваемым алгоритмом, учитывая паспортные данные, постоянные коэффициенты и значения фазных напряжений и токов, полученных с соответствующих датчиков, можно определить выходные

механические переменные АД в блоках вычисления электромагнитного момента и угловой скорости.

На рисунке 2.2.3 представлена общая схема для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК.

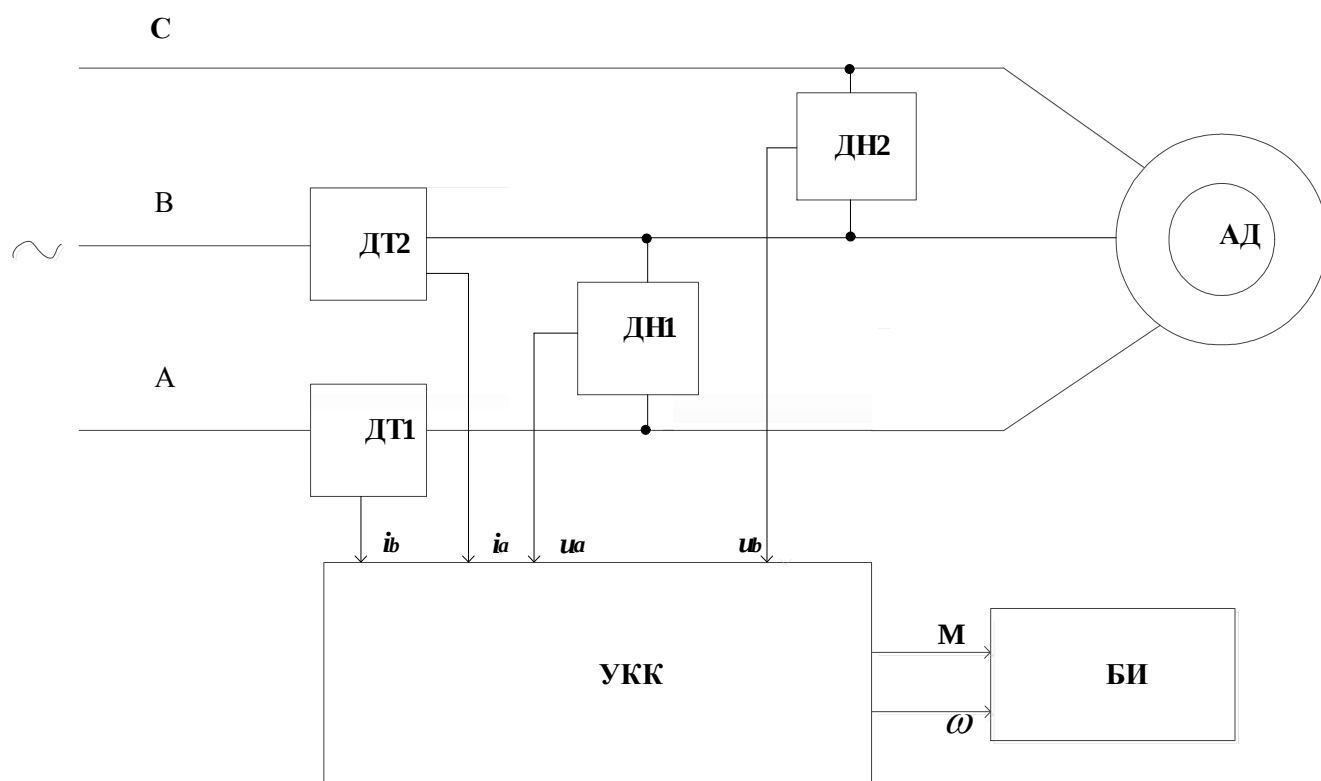


Рисунок 2.2.3 Общая схема контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК

Общая схема содержит АД, датчики тока (ДТ1, ДТ2) и напряжения (ДН1, ДН2), устройство косвенного контроля выходных механических переменных (УКК) и блок индикации (БИ). С помощью УКК (рисунок 2.2.4) определяем значения электромагнитного момента и угловой скорости, а затем выводим его на БИ.

В качестве датчиков могут быть использованы широко применяемых в ЭП переменного тока – датчики тока и напряжения. Блоки вычисления электромагнитного момента и угловой скорости АД могут быть реализованы

стандартными аппаратными средствами на основе интегральных микросхем либо с использованием микропроцессорных устройств.

В соответствии с системой уравнений (2.1.1) на рисунке 2.2.4 представлена блок–схема устройства косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД.

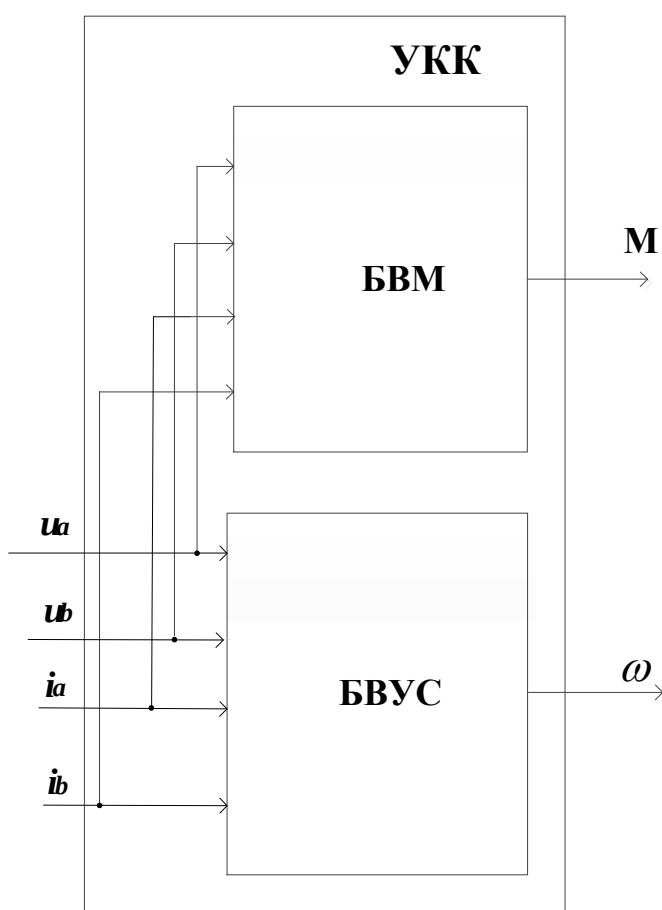


Рисунок 2.2.4 Блок–схема устройства косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

БВМ предназначен для вычисления электромагнитного момента АД может быть реализован на основе схемы, приведенной на рисунке 2.2.5, и содержит блоки интегрирования (БИН1, БИН2), суммирования (БС1–БС3), умножения (БУ1 – БУ3) и ввода коэффициентов (БВК1–БВК3).

В БВМ в соответствии с формулой

$$M(t) = \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[i_a(t) \cdot \int [u_b(t) - R_s \cdot i_b(t)] dt - i_b(t) \cdot \int [u_a(t) - R_s \cdot i_a(t)] dt \right],$$

учитывая паспортные данные, постоянные коэффициенты и значения фазных напряжений и токов, полученных с соответствующих датчиков, осуществляются операции умножения, интегрирования и суммирования подаваемых сигналов, а на выходе снимают вычисленное значение электромагнитного момента АД.

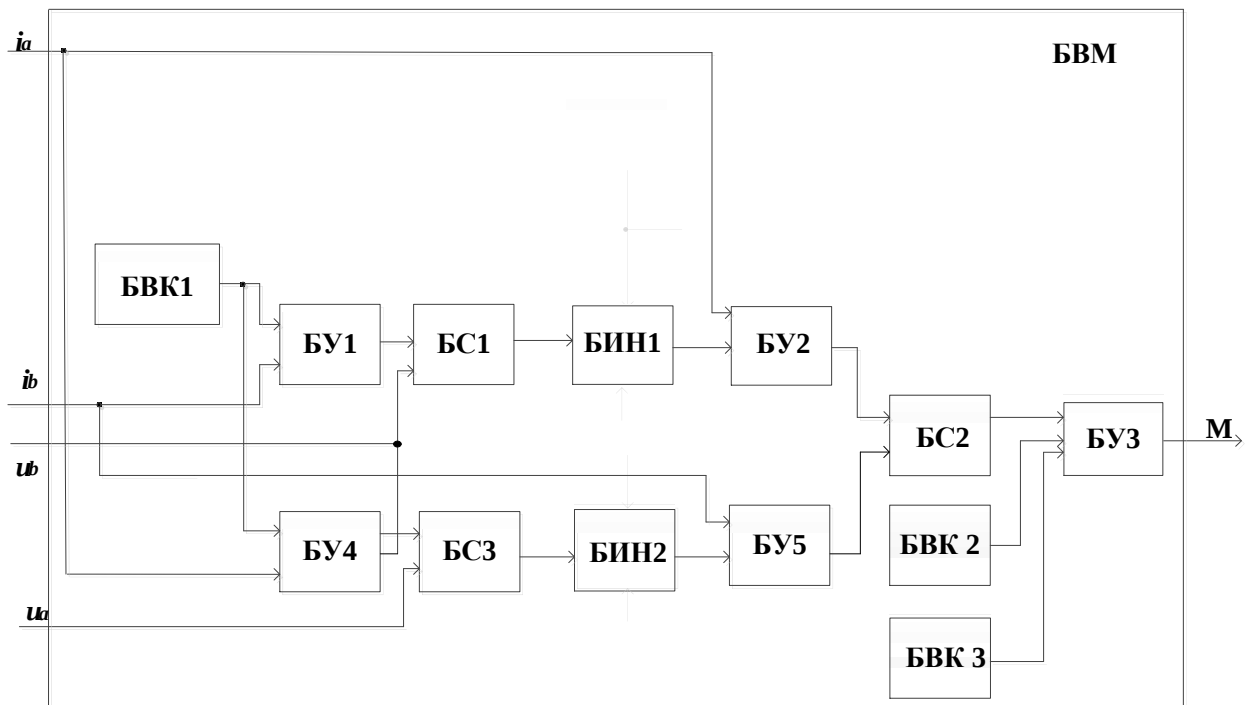


Рисунок 2.2.5 Блок–схема вычисления электромагнитного момента АД

БВУС построен в соответствии с формулой

$$\omega(t) = \omega_{\text{И}}(t) \cdot \left[1 + \Delta\omega_{\text{ИНТ}}(t) + \Delta\omega_{\text{ДИФ}}(t) \right],$$

и предназначен для определения угловой скорости АД (рисунок 2.2.6).

БВУС содержит блок суммирования (БС1), связанный с блоками вычисления динамической дифференциальной составляющей относительного значения угловой скорости (БВДДС), вычисления динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости (БВДИС), ввода коэффициентов (БВК1), умножения (БУ1), вычисления измеренного мгновенного значения угловой скорости (БВИМЗ). Сигнал с блока умножения (БУ1) поступает на блок индикации (БИ).

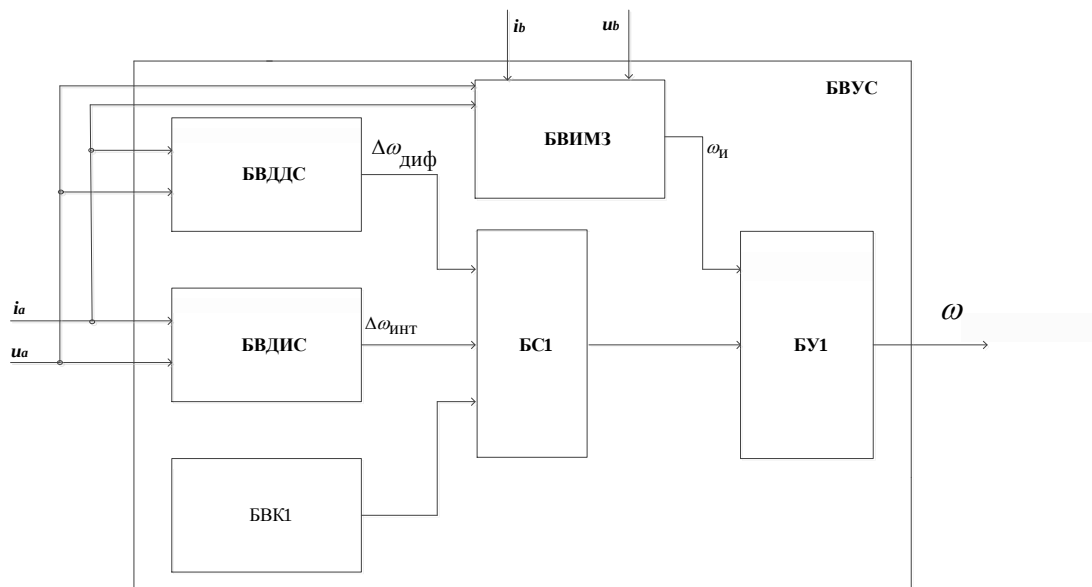


Рисунок 2.2.6 Блок вычисления угловой скорости АД

Блок–схемы БВДДС, БВДИС, БВИМЗ представлены на рисунках 2.2.7–2.2.8.

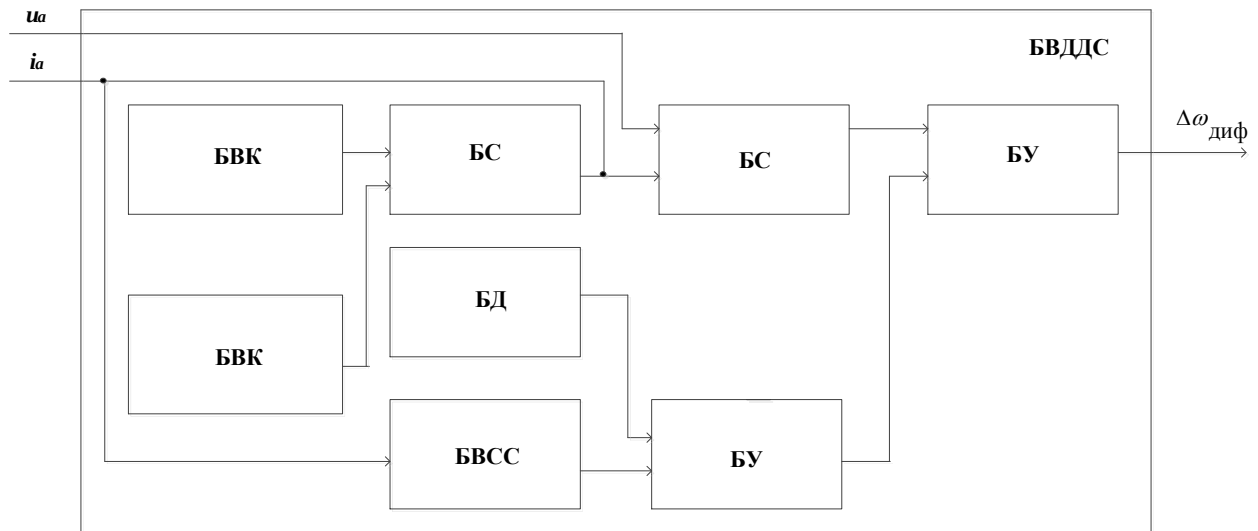


Рисунок 2.2.7 Блок динамической дифференциальной составляющей относительного значения угловой скорости

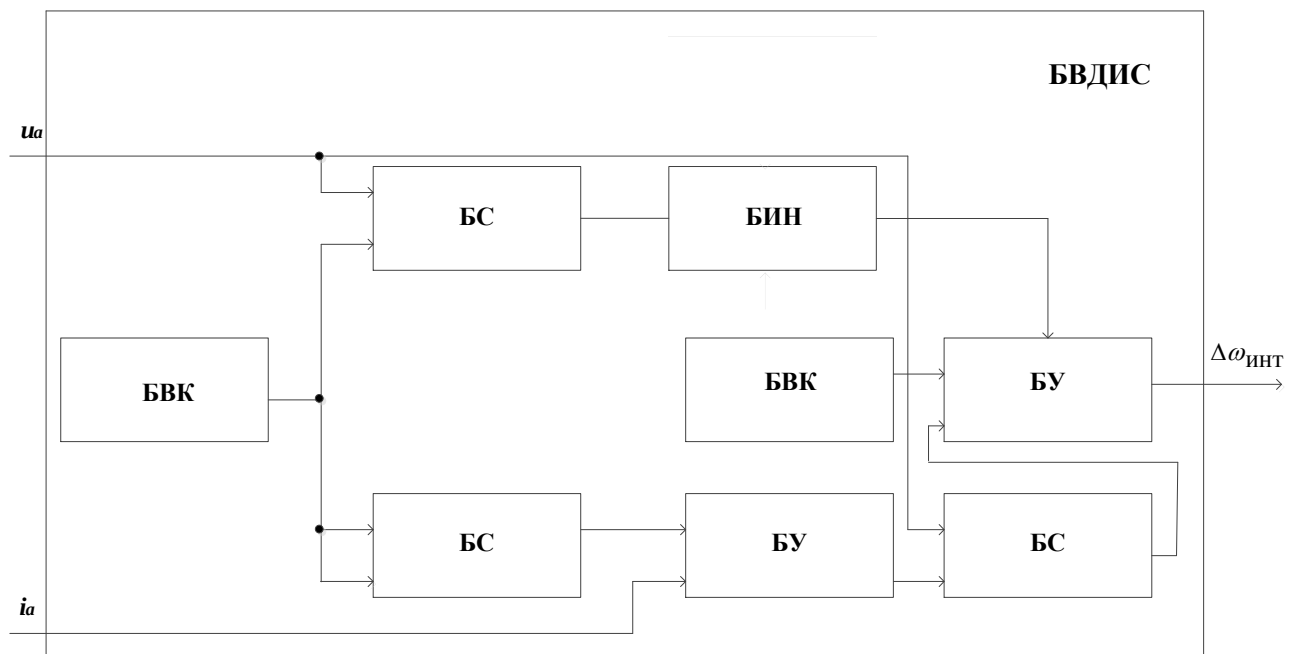


Рисунок 2.2.8 Блок вычисления динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости

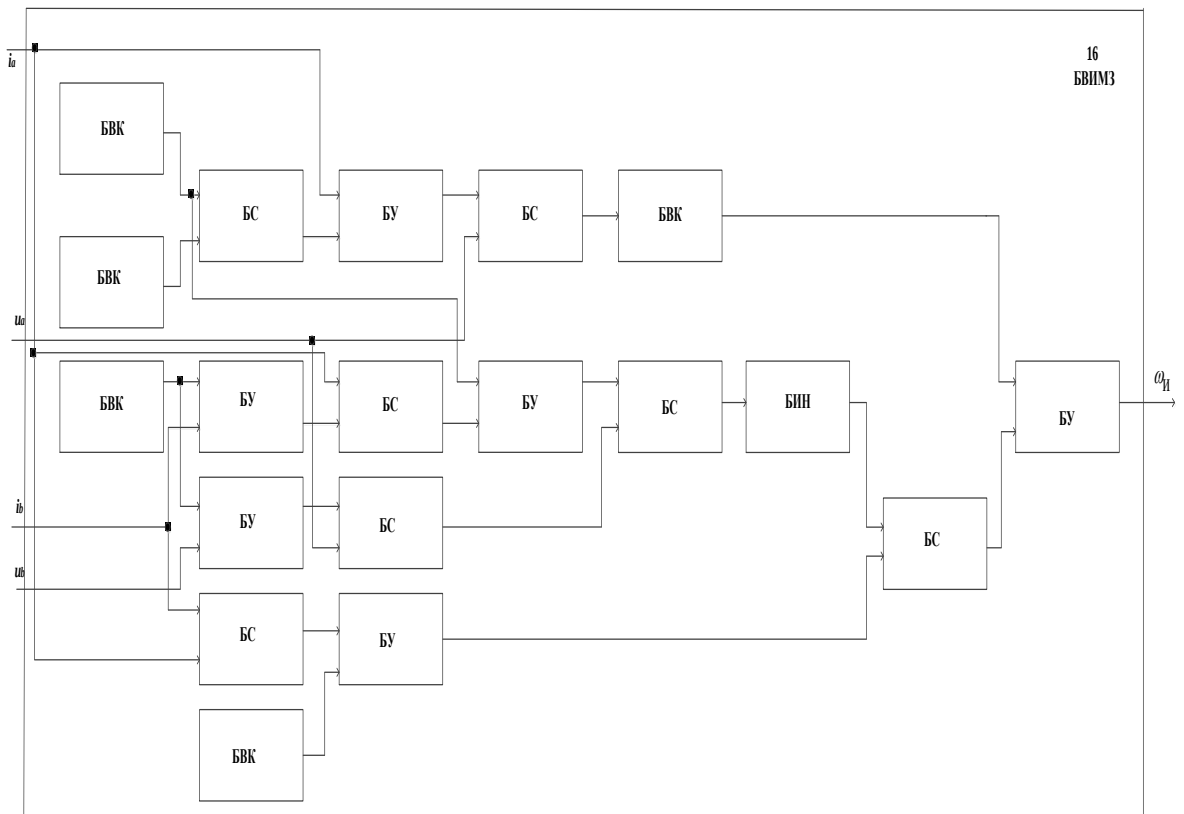


Рисунок 2.2.9 Блок вычисления измеренного мгновенного значения угловой скорости

В соответствии с выражением (2.1.2) построена обобщенная функциональная схема контроля выходных механических переменных АД (рисунок 2.2.10), учитывающая изменение температуры проводников обмотки статора, частоты основной гармоники напряжения статора и постоянный температурный коэффициент, зависящий от материала проводника.

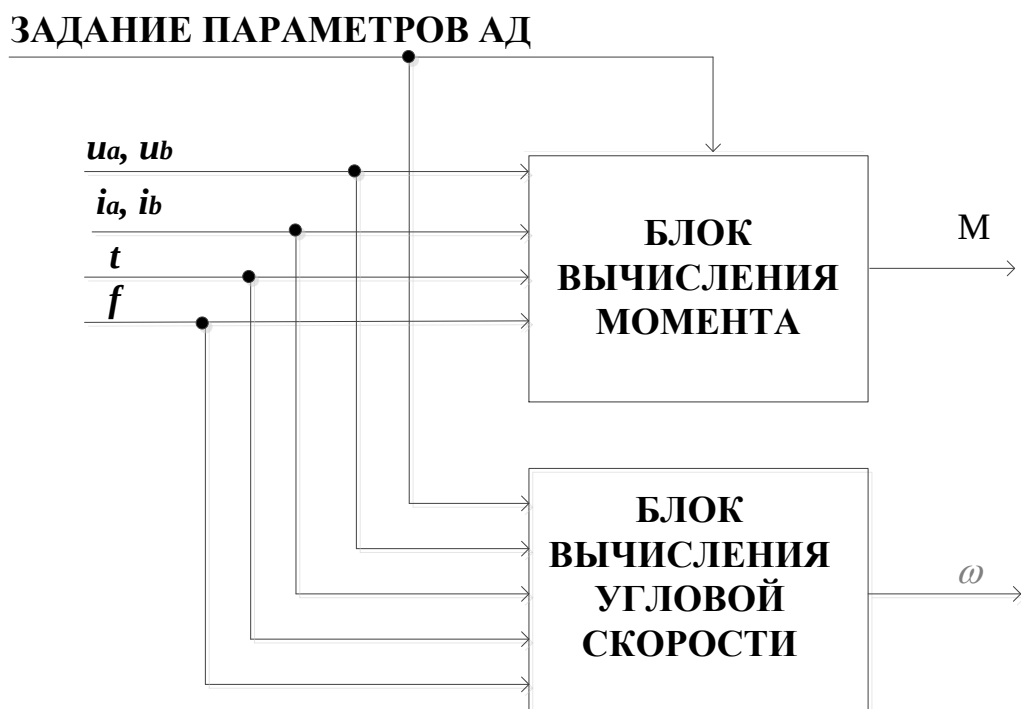


Рисунок 2.2.10 Обобщенная функциональная схема контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

На рисунке 2.2.11.представлен алгоритм, составленный по функциональной схеме (рисунок 2.2.10) и на основе выражения (2.1.2).

Предложенный алгоритм имеет повышенную точность определения электромагнитного момента и угловой скорости АД из-за учета изменения сопротивления обмотки статора, температуры проводников обмотки статора, частоты основной гармоники напряжения питания и температурного коэффициента, характеризующего свойства проводников обмотки статора АД.

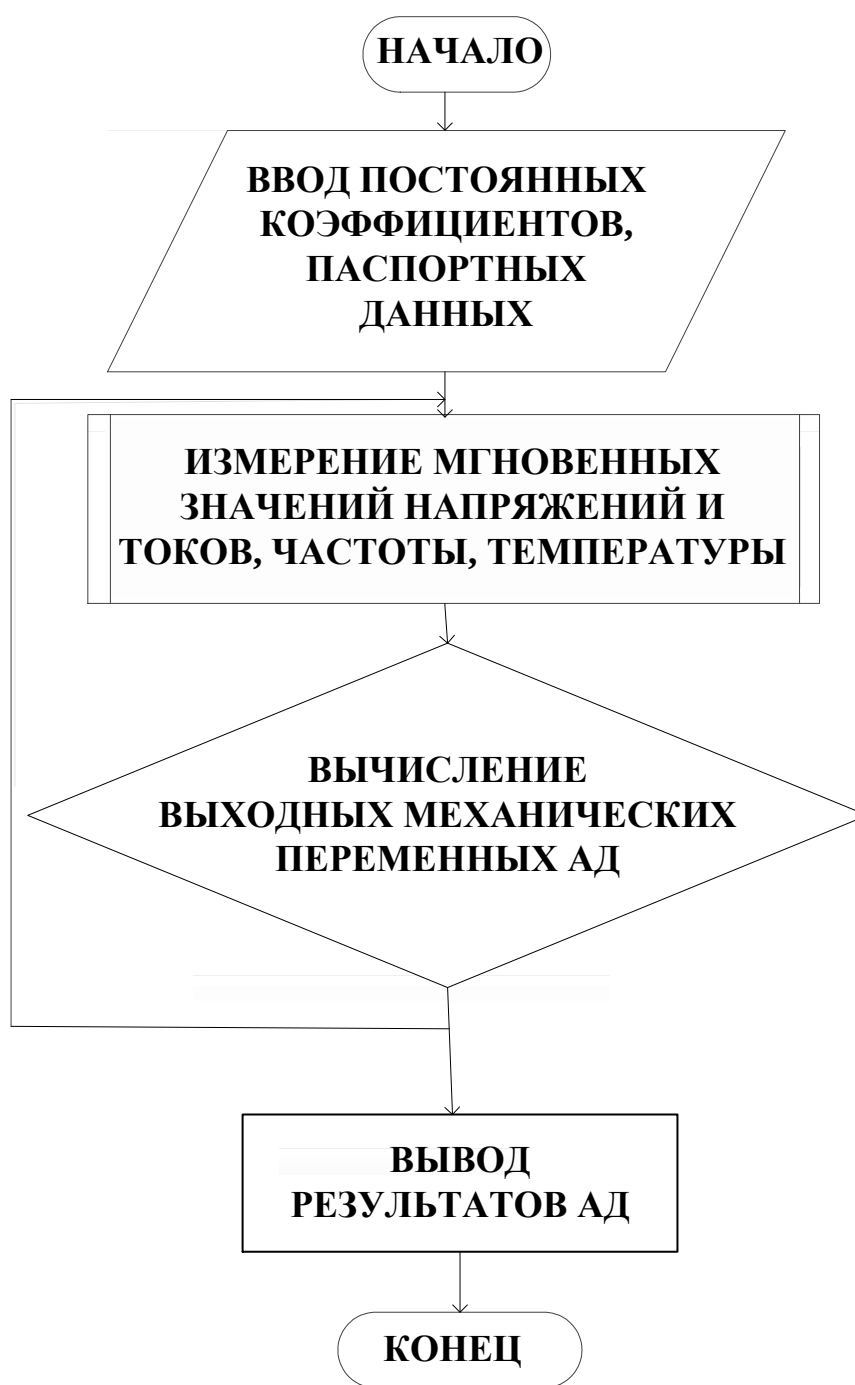


Рисунок 2.2.11 Алгоритм косвенного контроля выходных механических переменных АД

Для определения выходных механических переменных в алгоритм введены постоянные коэффициенты и параметры АД, измеренные мгновенные значения фазных напряжений и токов, частота основной гармоники напряжения, температура проводников обмотки статора, температурный коэффициент.

Общая схема для реализации предложенного алгоритма представлена на рисунке 2.2.12.

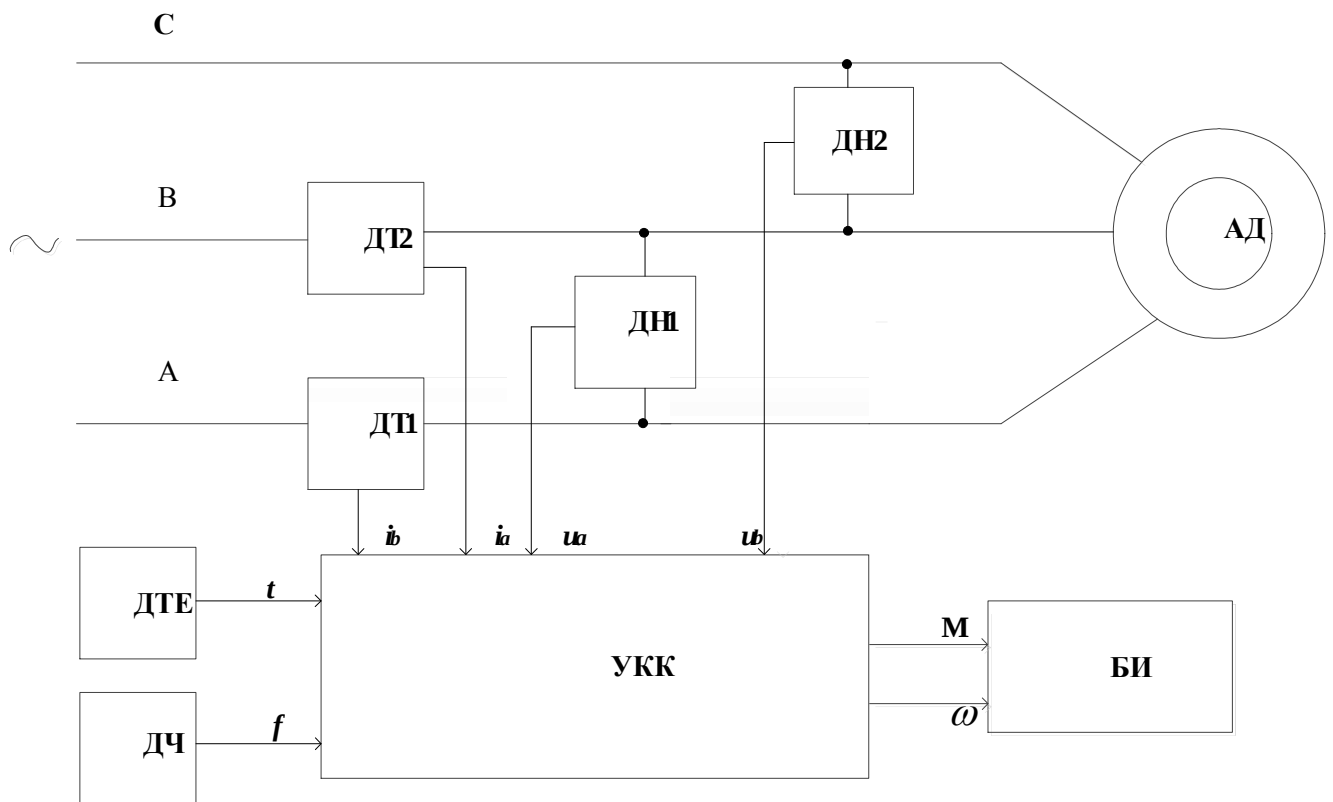


Рисунок 2.2.12 Общая схема контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК

В данной схеме аналогично алгоритму и обобщенной функциональной схеме, представленных на рисунках 2.2.10–2.2.11, контроль выходных механических переменных АД осуществляется в УКК (рисунок 2.2.13) на основе значений фазных токов и напряжений, полученных с датчиков тока и напряжения, затем полученные значения электромагнитного момента и угловой скорости АД выводят на БИ.

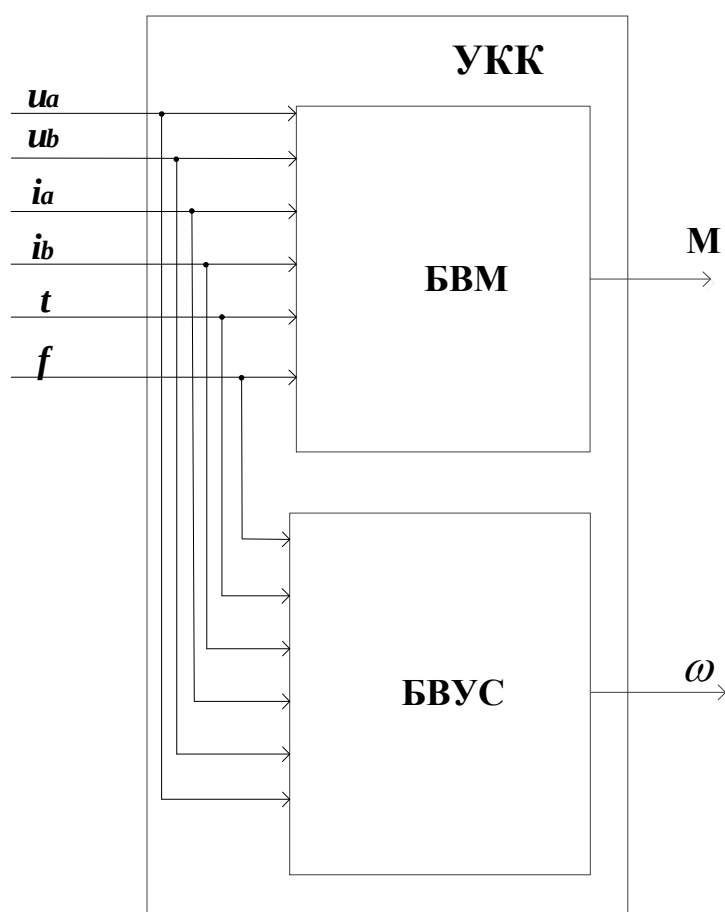


Рисунок 2.2.13 Блок–схема устройства косвенного контроля выходных механических переменных АД

Блоки БВМ и БВУС аналогичны блокам, представленными на рисунках 2.2.4 – 2.2.9. Отличительной особенностью этих блоков является наличие блока вычисления значений сопротивления обмотки статора с учетом температурного коэффициента. Вычисления проводятся согласно выражению (2.1.2).

2.3 Выводы по главе

1. Для математического описания АД с устройством косвенного контроля наиболее целесообразным является трехфазная модель АД во вращающейся системе координат, позволяющая определить выходные механические переменные.

2. Предложенные аналитические зависимости математического описания косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД, позволяют с заданной точностью рассчитать значения и проводить контроль выходных механических переменных.

3. Для обеспечения требуемой точности контроля выходных механических переменных в аналитических зависимостях математического описания ЭП с устройством косвенного контроля выходных механических переменных АД предложено в математической модели АД с устройством косвенного контроля исключить интегральную составляющую переходом в ортогональную пару, используя при этом преобразования Эйлера, Фурье и Парсеваля.

4. Разработанные алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД позволяют проводить контроль этих переменных с повышенной точностью, и отличаются от известных простотой реализации схемных решений.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УСТРОЙСТВОМ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

3.1 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания асинхронного двигателя

Для исследования и оценки погрешности определения электромагнитного момента и угловой скорости УКК АД использован метод имитационного моделирования [2, 6, 15, 19, 38, 79, 82], а в качестве средства моделирования – компьютерная среда MatLab. На рисунке 3.1.1 приведена имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя. В рассматриваемой модели входными величинами АД являются токи и напряжения трехфазной питающей сети, а моделирование осуществляется с постоянным шагом $\Delta t = 0.0001$ с.

В состав имитационной модели входят суперблоки:

- модель АД (AD) выполнена на основе математического описания асинхронного двигателя [47] (рисунок 3.1.2);
- формирователь фазных напряжений статорных обмоток в трехфазной системе координат (FOR U1) (рисунок 3.1.3); вычислитель действующего тока статора (FI1); инерционная масса (In_massa);
- устройство косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД (УКК) (рисунок 3.1.4);
- устройство сравнения (model sravnenia) полученных значений электромагнитного момента и угловой скорости АД и с устройства косвенного контроля.

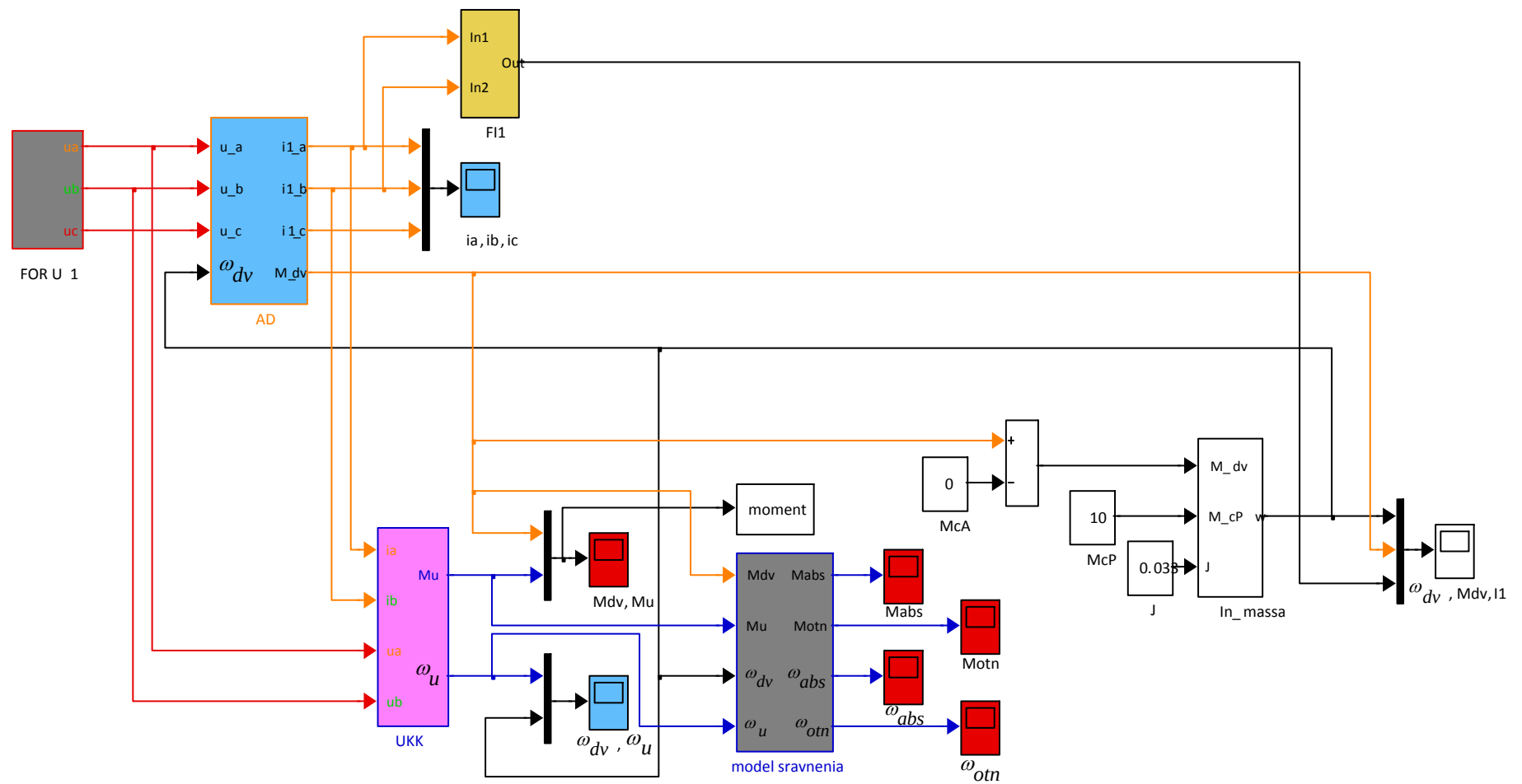


Рисунок 3.1.1 Имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя

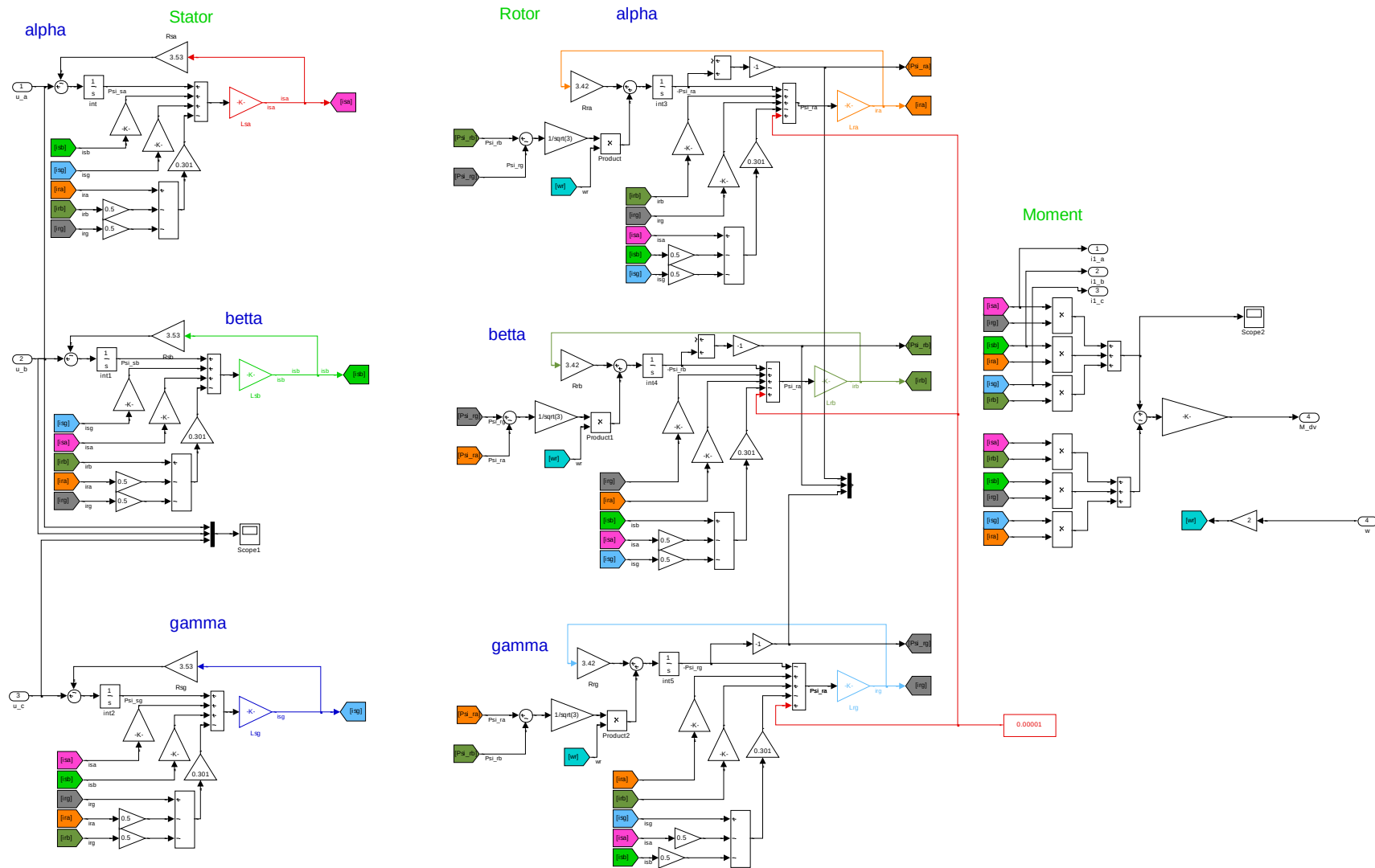


Рисунок 3.1.2 Имитационная модель трехфазного АД

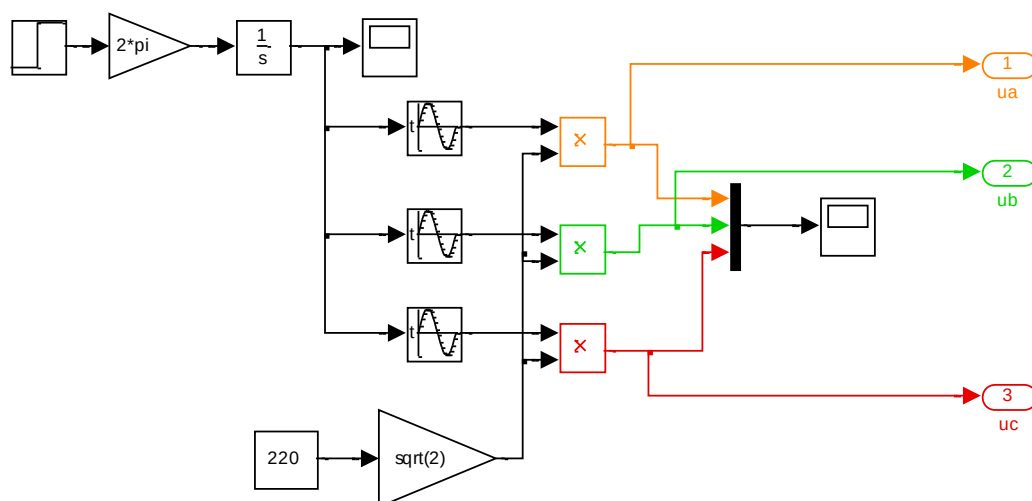


Рисунок 3.1.3 Блок–схема формирователя напряжения

На основе выражения (2.1.1) и блок-схемы устройства косвенного контроля выходных механических переменных АД (рисунок 2.2.4) построена имитационная модель устройства косвенного контроля в АЭП, представленная на рисунке 3.1.4.

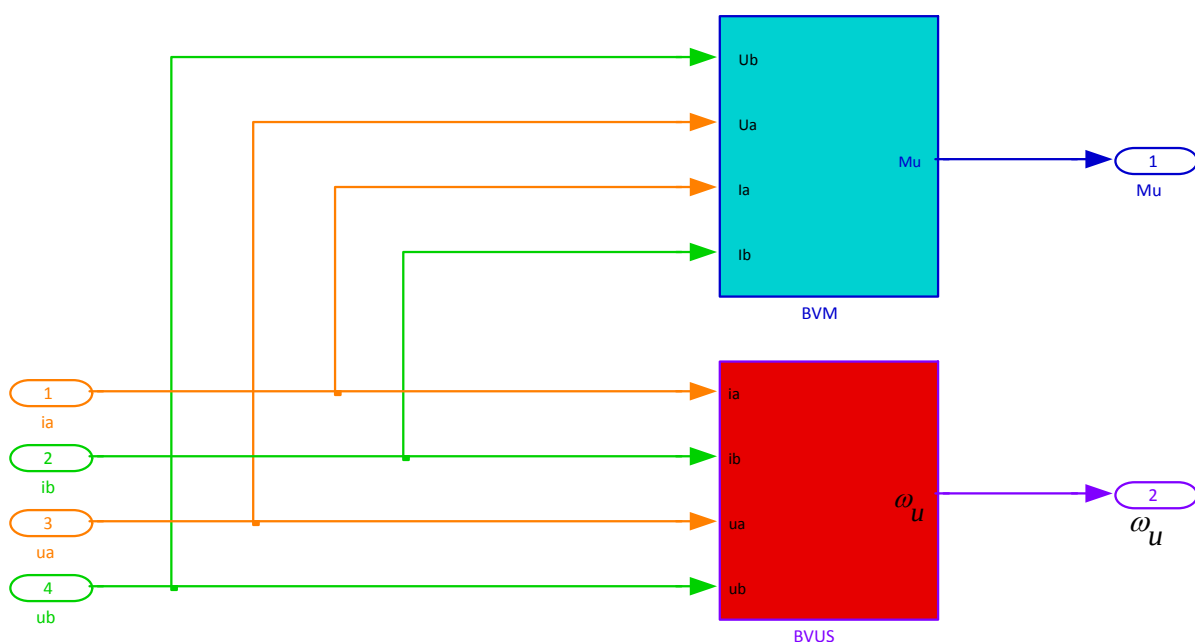


Рисунок 3.1.4 Имитационная модель УКК электромагнитного момента и угловой скорости АД

УКК включает в себя блок вычисления электромагнитного момента (BVM) и угловой скорости (BVUS), представленные на рисунках 3.1.5 и 3.1.6 соответственно. Обе схемы реализованы на основе системы уравнений (2.1.1) и блок-схем, представленных на рисунках 2.2.5 и 2.2.6.

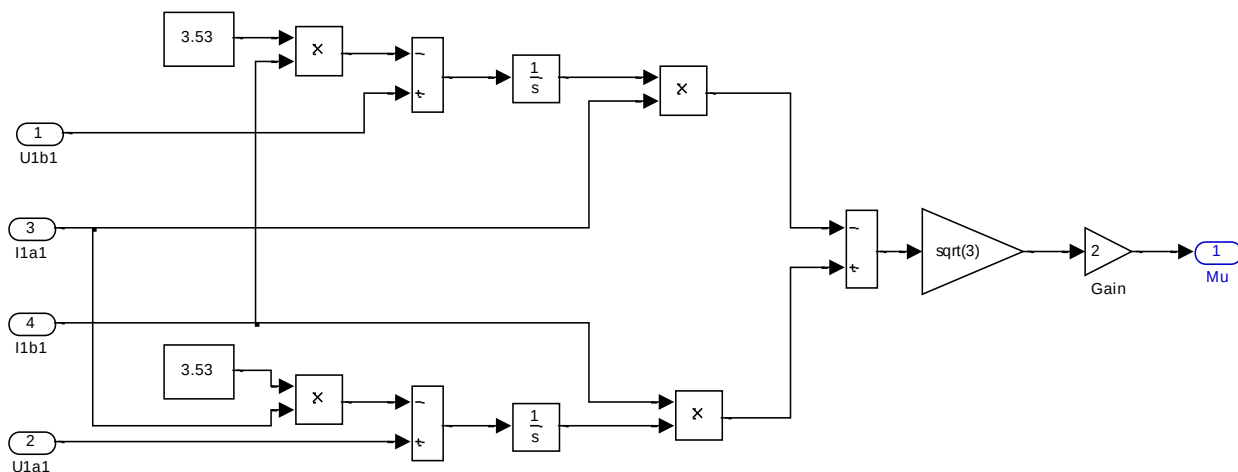


Рисунок 3.1.5 Иммитационная модель блока вычисления момента BVM асинхронного электродвигателя

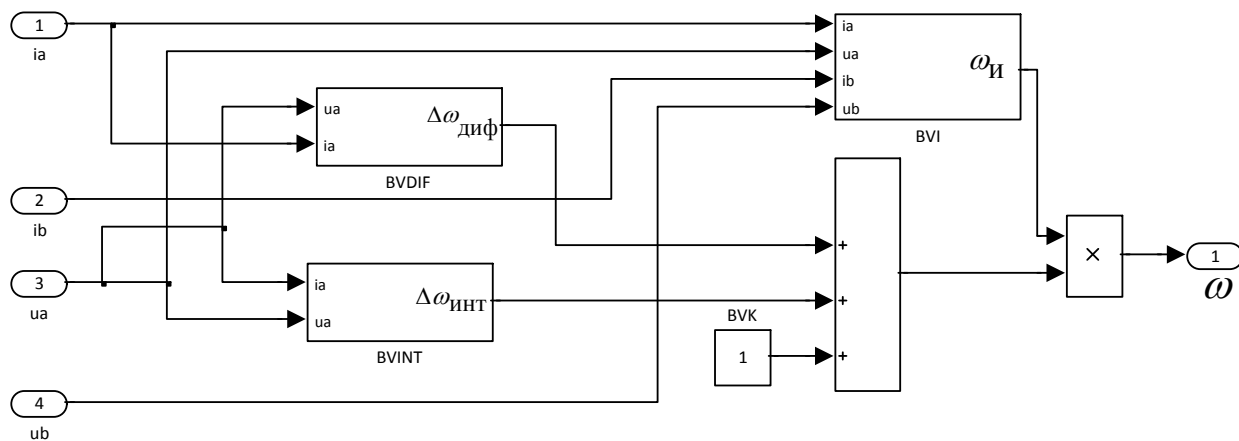


Рисунок 3.1.6 Иммитационная модель блока вычисления угловой скорости BVUS асинхронного электродвигателя

Имитационная модель блока вычисления угловой скорости АД содержит блок–схемы вычисления динамической дифференциальной составляющей относительного значения угловой скорости (BVDIF), динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости (BVINT), измеренного мгновенного значения угловой скорости (BVI), построенные в соответствии со схемами на рисунках 2.2.7–2.2.9, и представленные на рисунках 3.1.7 – 3.1.9.

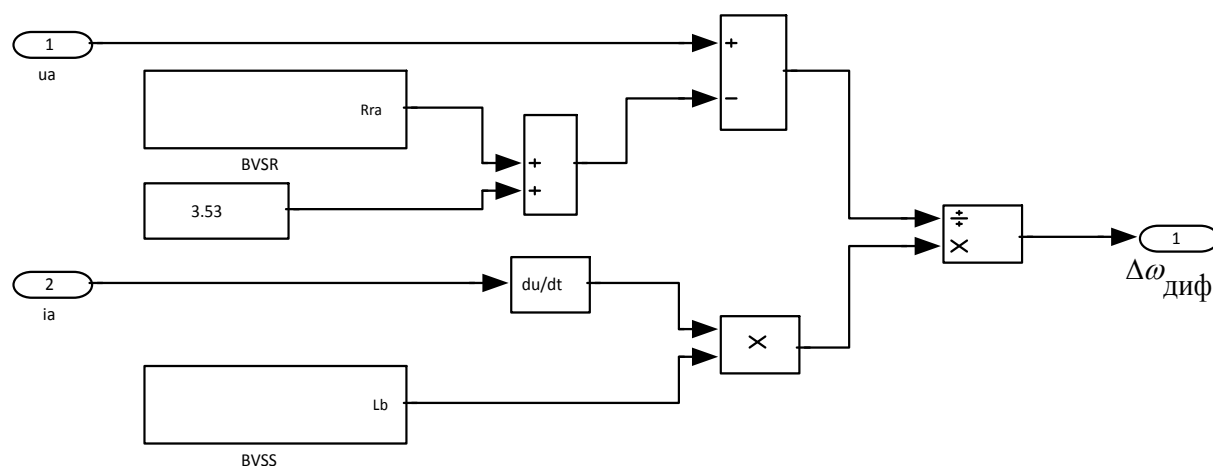


Рисунок 3.1.7 Имитационная модель блока вычисления динамической дифференциальной составляющей относительного значения угловой скорости BVDIF

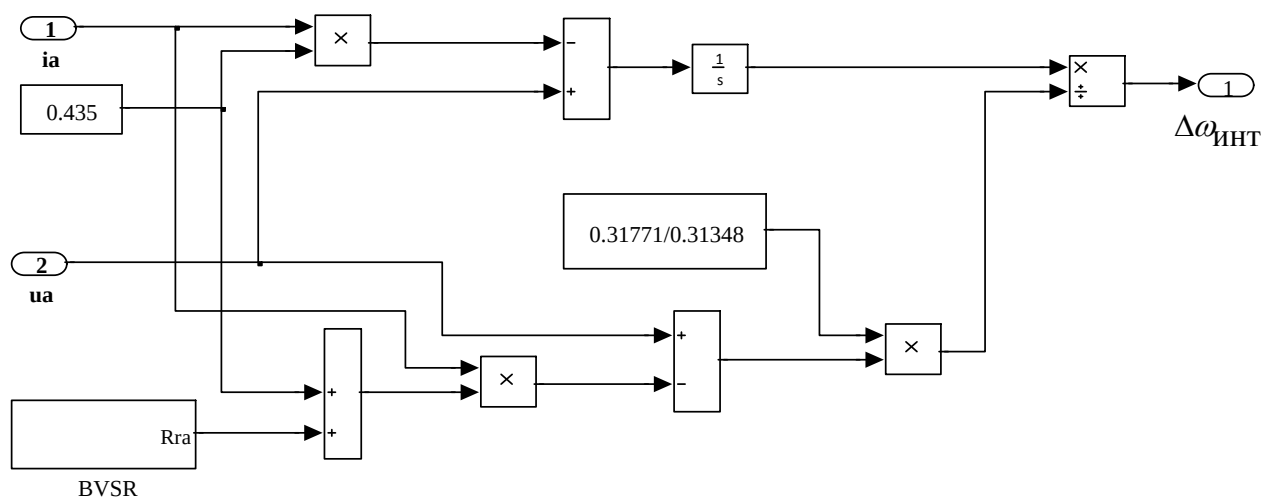


Рисунок 3.1.8 Имитационная модель блока вычисления динамической интегральной составляющей относительного значения угловой скорости BVINT

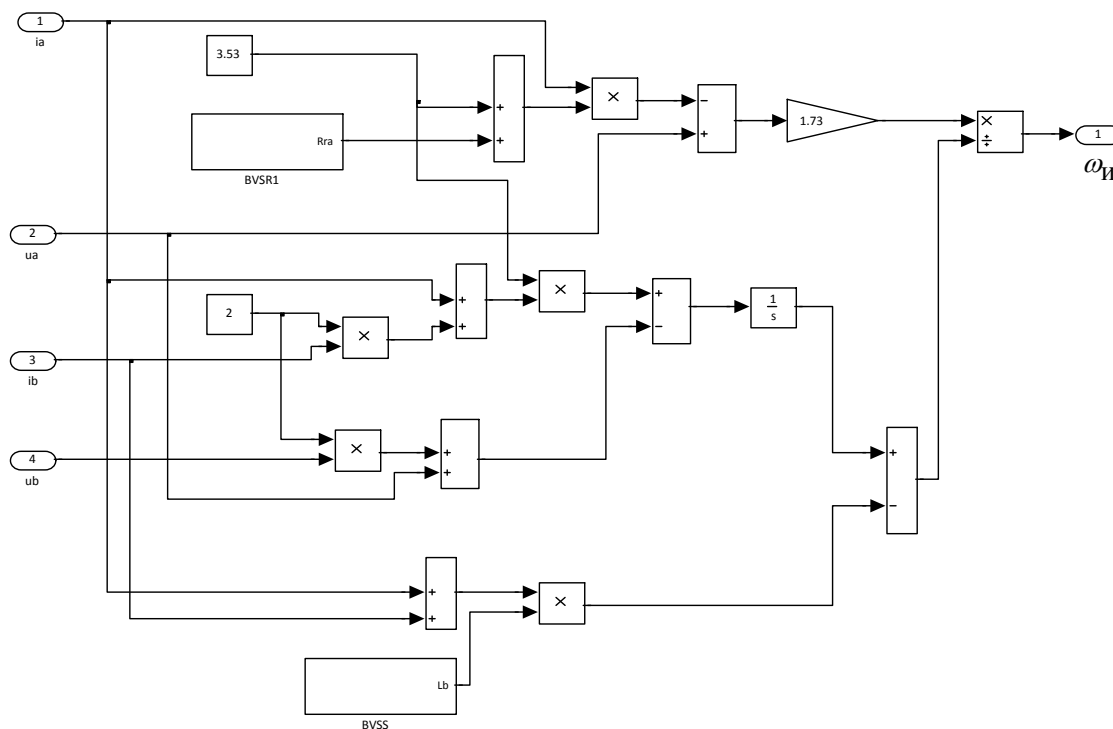


Рисунок 3.1.9 Имитационная модель блока вычисления измеренного мгновенного значения угловой скорости BVI

Схема набора имитационной модели вычислителя действующего значения тока статора асинхронного двигателя приведена на рисунке 3.1.10

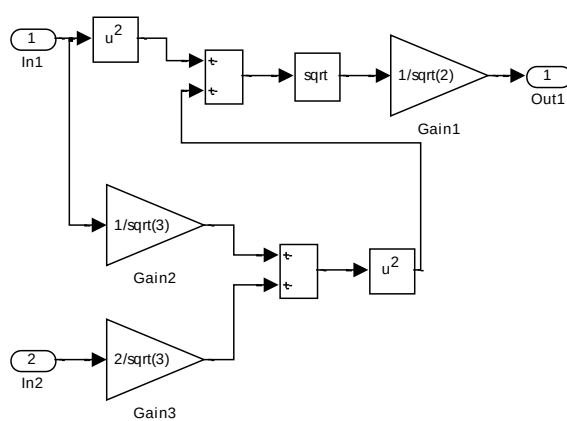


Рисунок 3.1.10 Имитационная модель вычислителя действующего значения тока статора асинхронного двигателя

Цель исследования имитационной модели АД с устройством косвенного контроля выходных механических переменных в ЭП заключается в проверке и оценке контроля УМК электромагнитного момента и угловой скорости.

Исследование проводилось на имитационной модели для режима прямого пуска АД. В таблице 3.1.1 представлены данные, используемые при моделировании, согласно методике представленной в [35, 101].

Таблица 3.1.1

Основные данные исследуемого двигателя АИР 90L4

		Ед. изм	
Число пар полюсов	2р		4
Число фаз	m		3
Частота питающего напряжения	f	Гц	50
Номинальная мощность	P _{ном}	кВт	2,2
Номинальное напряжение	U _{1л}	В	380
Номинальный ток	I _{1ном.ф}	А	4,96
Активное сопротивление обмотки статора	R _s	Ом	3,53
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора	R' _r	Ом	3,42
Индуктивность рассеяния обмотки статора	L _μ	Гн	0,301
Индуктивность обмотки статора	L _{1s}	Гн	0,01248
Приведенная индуктивность обмотки ротора	L' _{2r}	Гн	0,01671
Момент инерции	J _э	кг·м ²	0,033

Результаты имитационных исследований прямого пуска АД (АИР90L4), при различных значениях нагрузки, представлены в виде характеристик тока $I(t)$, скорости $\omega(t)$, момента $M(t)$, которые получены с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя на рисунках 3.1.11–3.1.13. Зависимости электромагнитного момента $M(t)$ и угловой скорости вращения $\omega(t)$ приведены на рисунках 3.1.14–3.1.15, здесь:

M_{dv} , ω_{dv} – характеристики момента и угловой скорости, полученные с АД;

M_u , ω_u – характеристики момента и угловой скорости, полученные с устройства косвенного контроля.

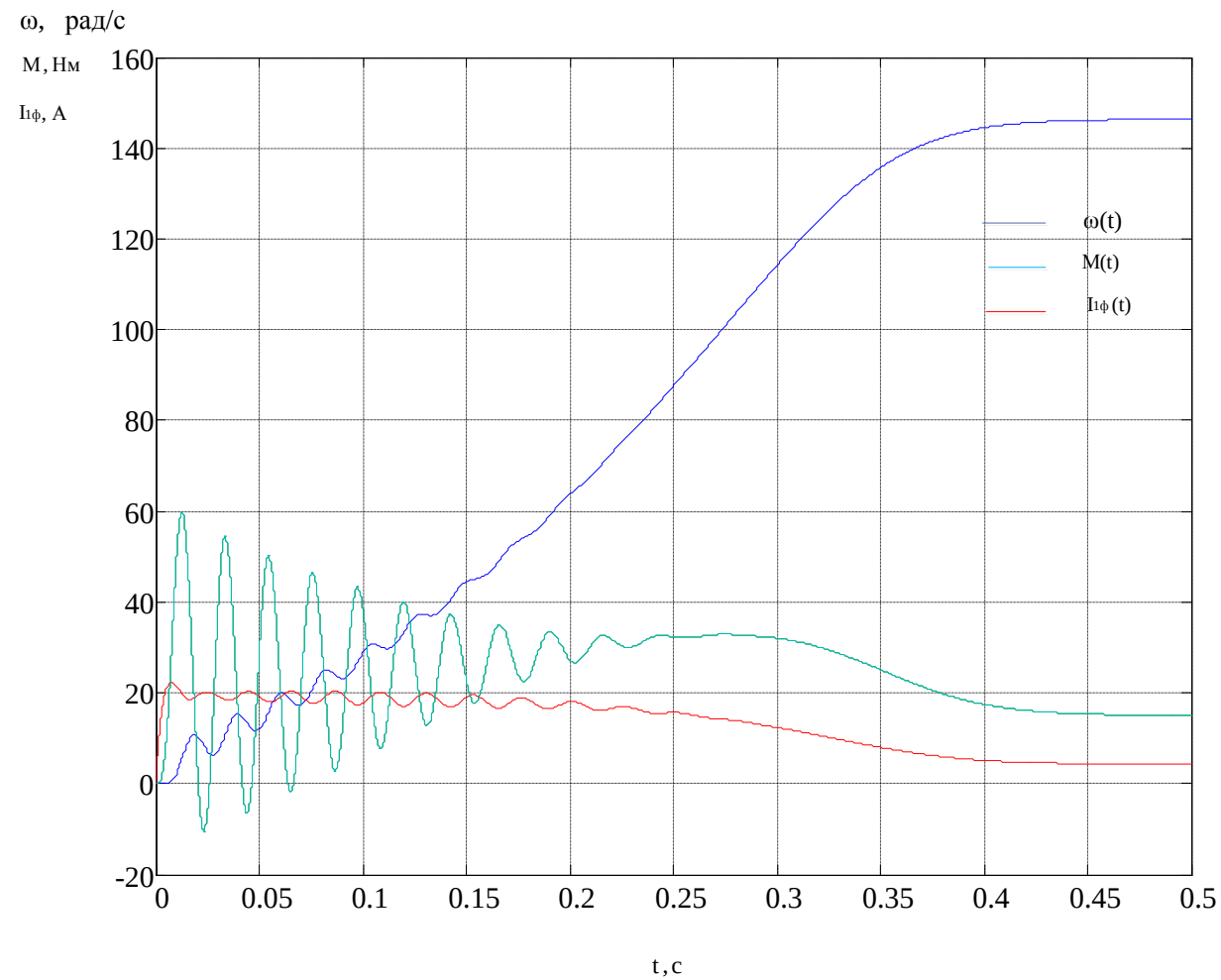


Рисунок 3.1.11 Зависимости $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (прямой пуск при $f=50$ Гц, $M_c=10$ Нм)

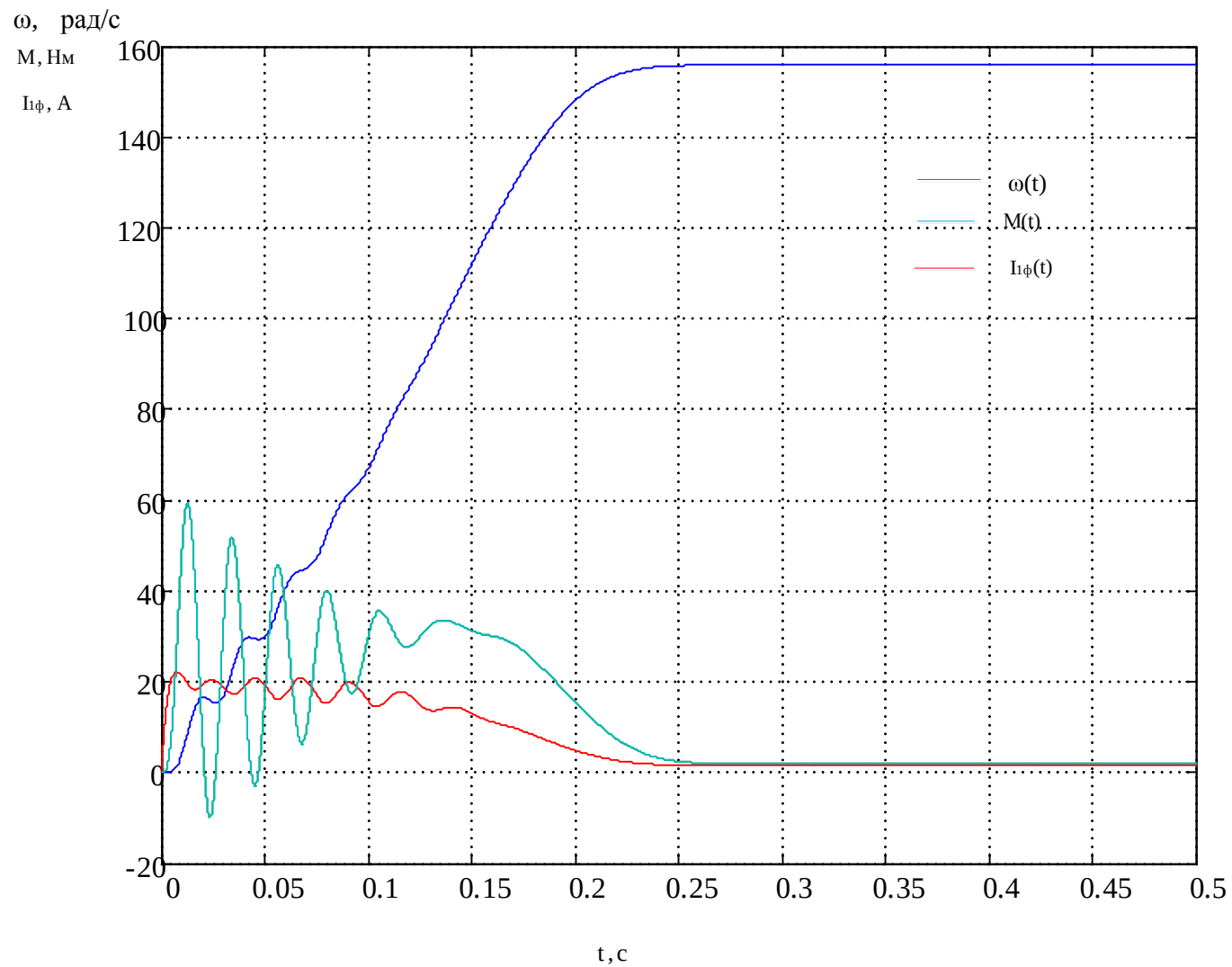


Рисунок 3.1.12 Зависимости $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (прямой пуск при $f=50$ Гц, $M_c=2$ Нм)

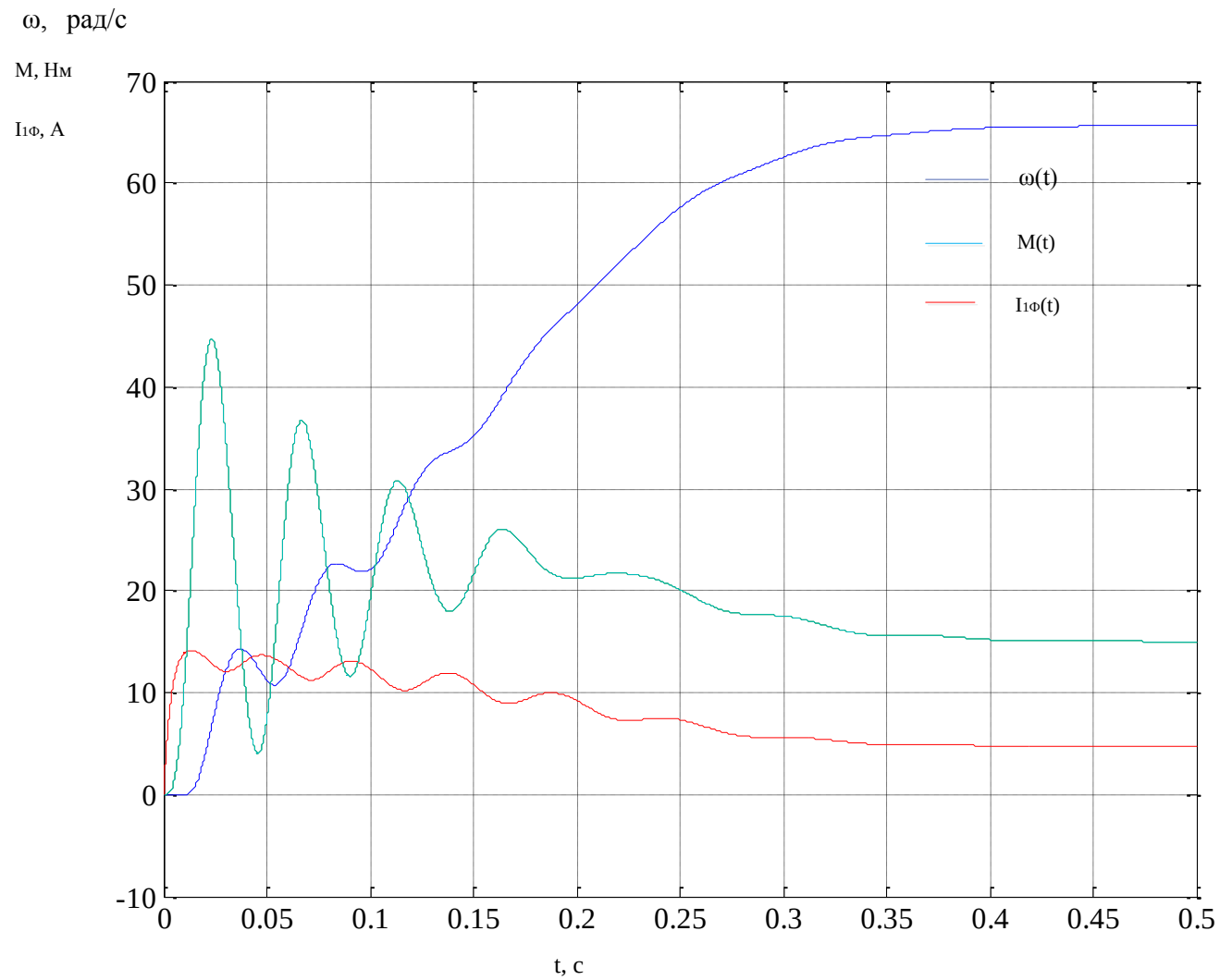


Рисунок 3.1.13 Зависимости $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (прямой пуск при $f=25$ Гц, $M_c=15$ Нм, $U/f=\text{const}$)

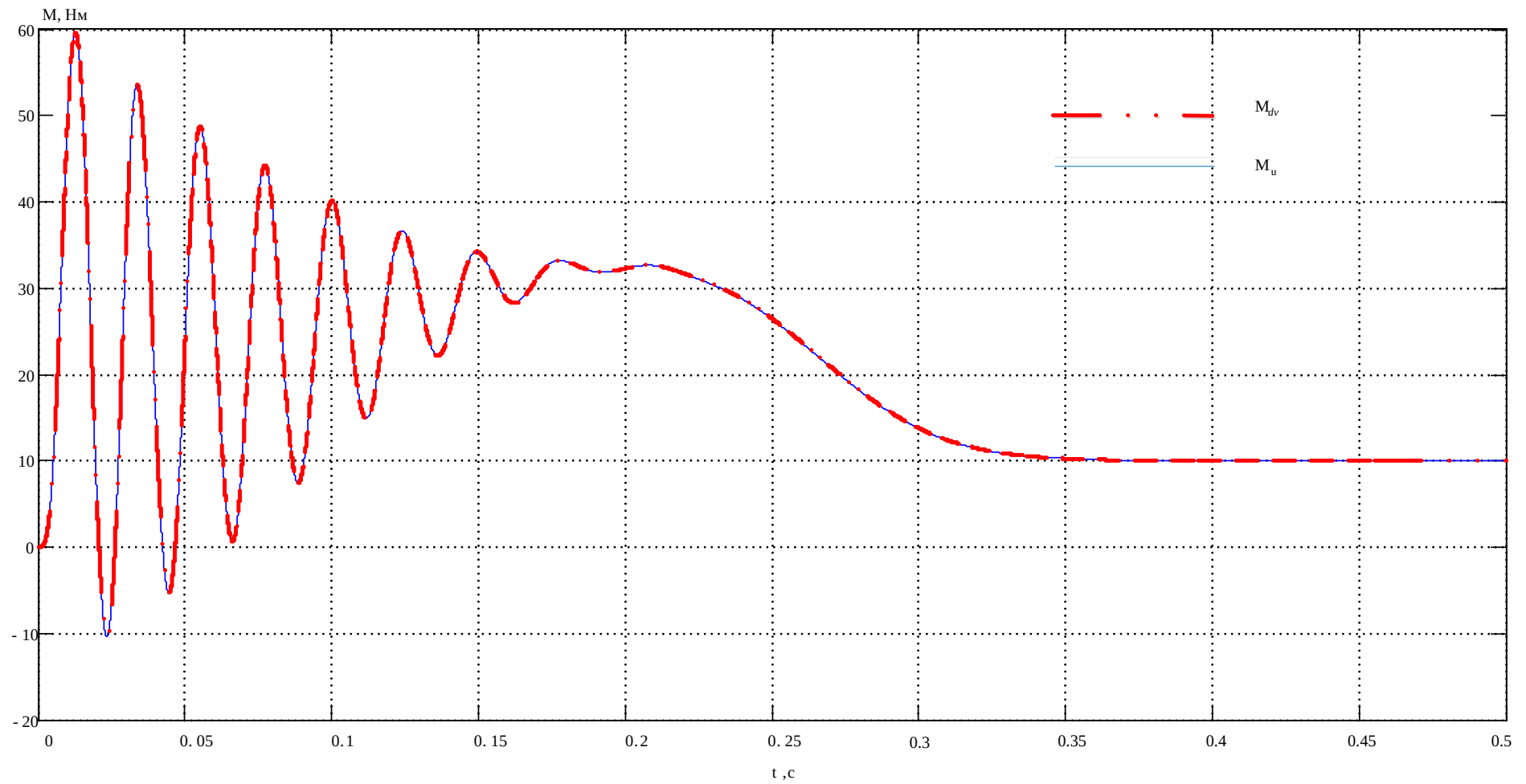


Рисунок 3.1.14 Характеристики $M(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (прямой пуск при $f=50$ Гц, $M_c=10$ Нм)

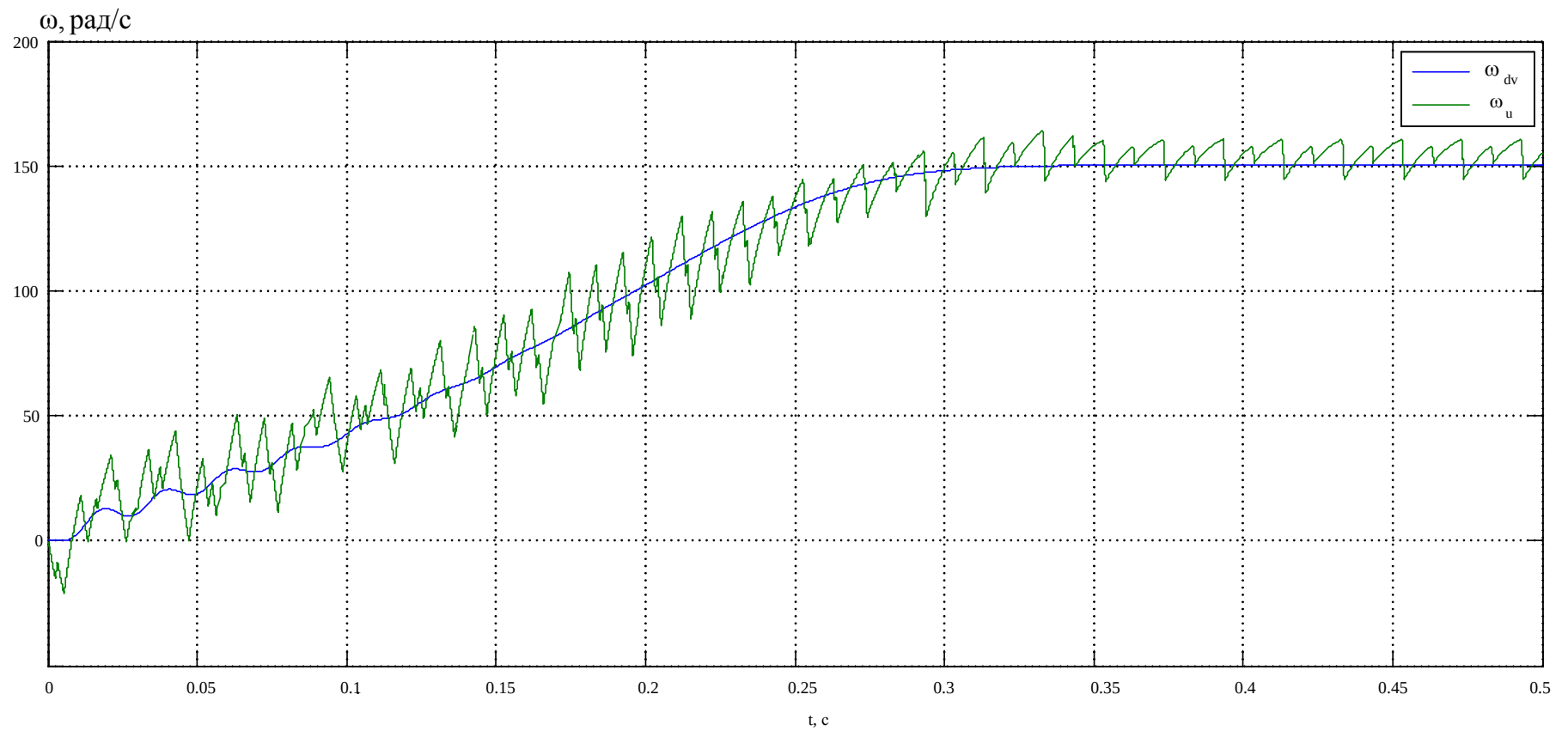


Рисунок 3.1.15 Характеристики скорости $\omega(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя

Из вышеприведенных характеристик следует, что зависимости электромагнитного момента и угловой скорости, полученные с выхода АД и УКК, имеют сходимость допустимую в инженерных расчетах.

Для оценки полученных результатов в блоке сравнения модели определяются абсолютная и относительная погрешности электромагнитного момента и угловой скорости, полученные с АД и с УКК, по нижеприведенным выражениям

$$\Delta M = M_{dv} - M_u; \delta_M = \frac{M_{dv} - M_u}{M_{dv}} \cdot 100\%; \Delta \omega = \omega_{dv} - \omega_u; \delta_\omega = \frac{\omega_{dv} - \omega_u}{\omega_{dv}} \cdot 100\%$$

где ω_{dv}, ω_u – угловая скорость электродвигателя и блока вычисления;

M_{dv}, M_u – электромагнитный момент электродвигателя и блока вычисления момента;

$\Delta M, \delta_M$ – абсолютная и относительная погрешности электромагнитного момента;

$\Delta \omega, \delta_\omega$ – абсолютная и относительная погрешности угловой скорости.

Временные зависимости абсолютной и относительной погрешностей результатов имитационного моделирования приведены на рисунках 3.1.16–3.1.19, а их значения сведены в таблицу 3.1.2.

Таблица 3.1.2

Абсолютная и относительная погрешности электромагнитного момента и угловой скорости

Абсолютная погрешность		Относительная погрешность, %	
$\Delta M, 10^{-4}, \text{М} \cdot \text{н}$	$\Delta \omega, \text{рад/с}$	$\delta_M, 10^{-2}$	δ_ω
-0.004...0,003	-12...12	-0.1...0.1	-8 ... +8

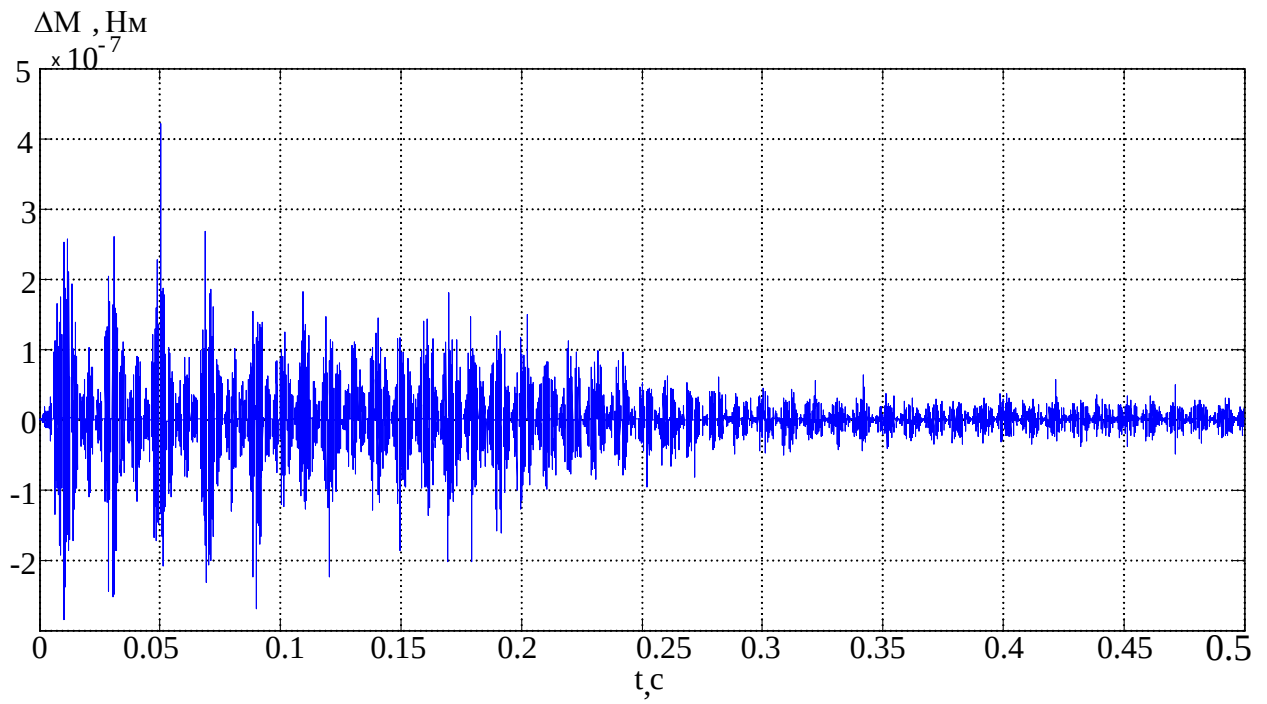


Рисунок 3.1.16 Временные зависимости абсолютной погрешности электромагнитного момента $\Delta M(t)$

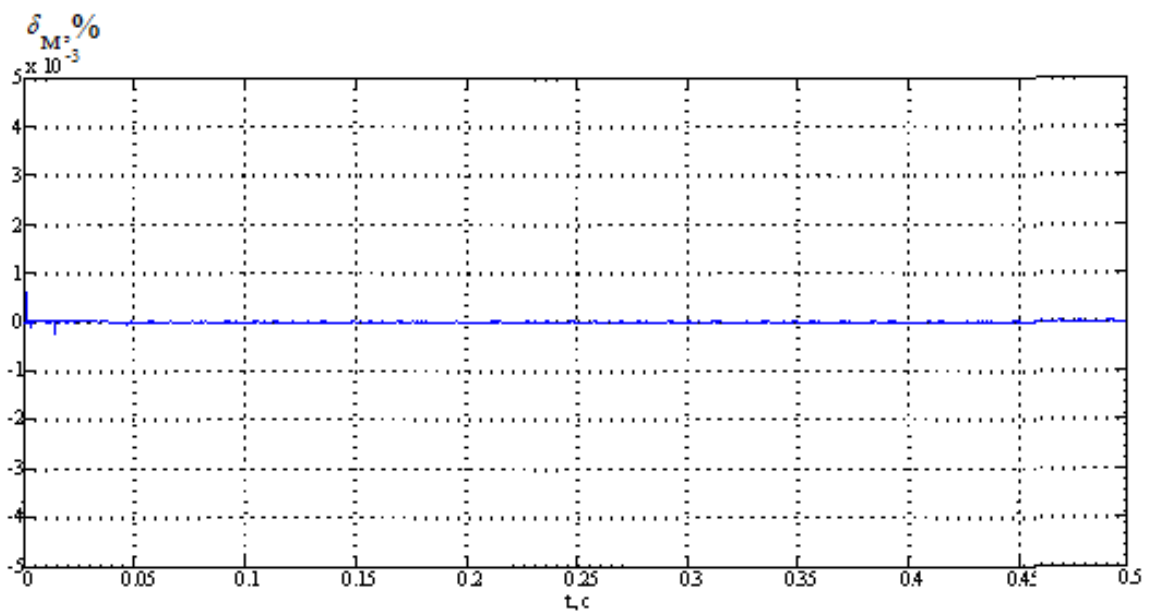


Рисунок 3.1.17 Временные зависимости относительной погрешности электромагнитного момента $\delta_M(t)$

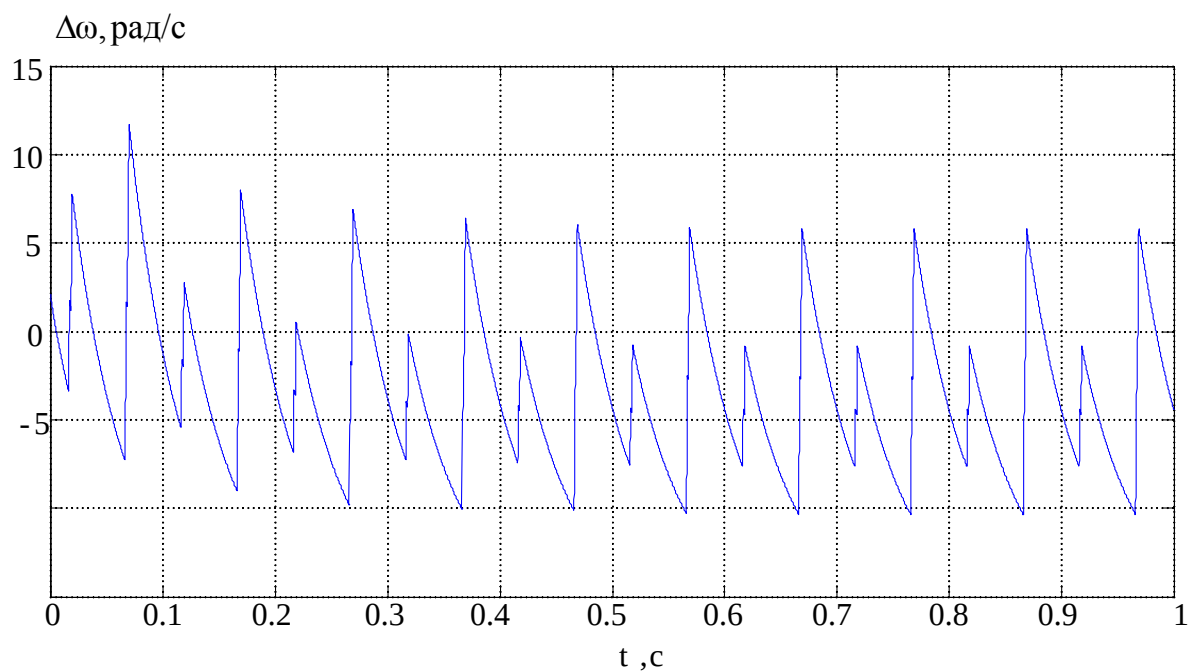


Рисунок 3.1.18 Временные зависимости абсолютной погрешности угловой скорости $\Delta\omega(t)$

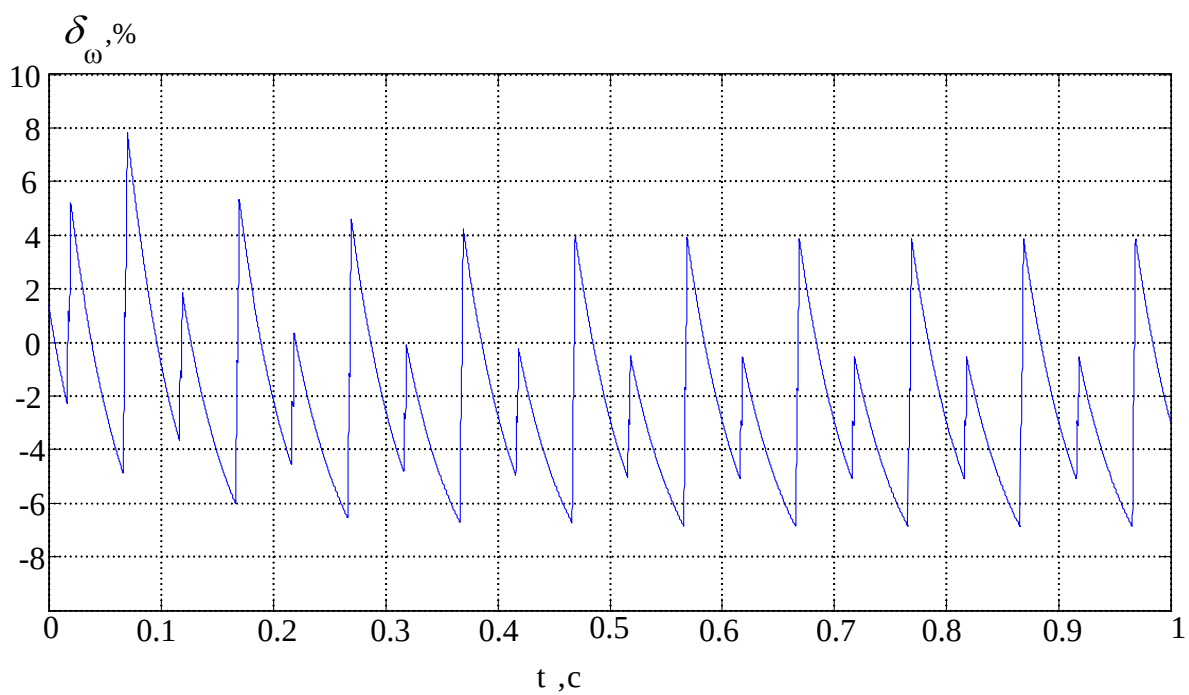


Рисунок 3.1.19 Временные зависимости относительной погрешности угловой скорости $\delta_\omega(t)$

Анализ результатов значений погрешностей электромагнитного момента и угловой скорости, приведенные в таблице 3.1.2 показывает, что относительная погрешность измерения электромагнитного момента составляет менее 1%, угловой скорости не более 10 % из-за наличия корректирующего звена в блоке вычисления скорости.

3.2 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания асинхронного двигателя

На рисунке 3.2.1 приведена имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД при частотном скалярном управлении с учетом квантования по уровню и времени. Квантование сигналов управления, токов и напряжений двигателя по уровню имеет место в современных цифровых системах управления электроприводов и должно быть учтено при контроле выходных переменных.

Рассматриваемая имитационная модель аналогична модели АД с устройством косвенного контроля при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя, представленной на рисунке 3.1.1.

Однако, в предлагаемой модели АД с устройством косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом квантования по уровню и времени, присутствуют блоки квантования по уровню и времени, которые не влияют на работу систему автоматического управления асинхронного ЭП, но при этом улучшается точность определения значений электромагнитного момента и угловой скорости.

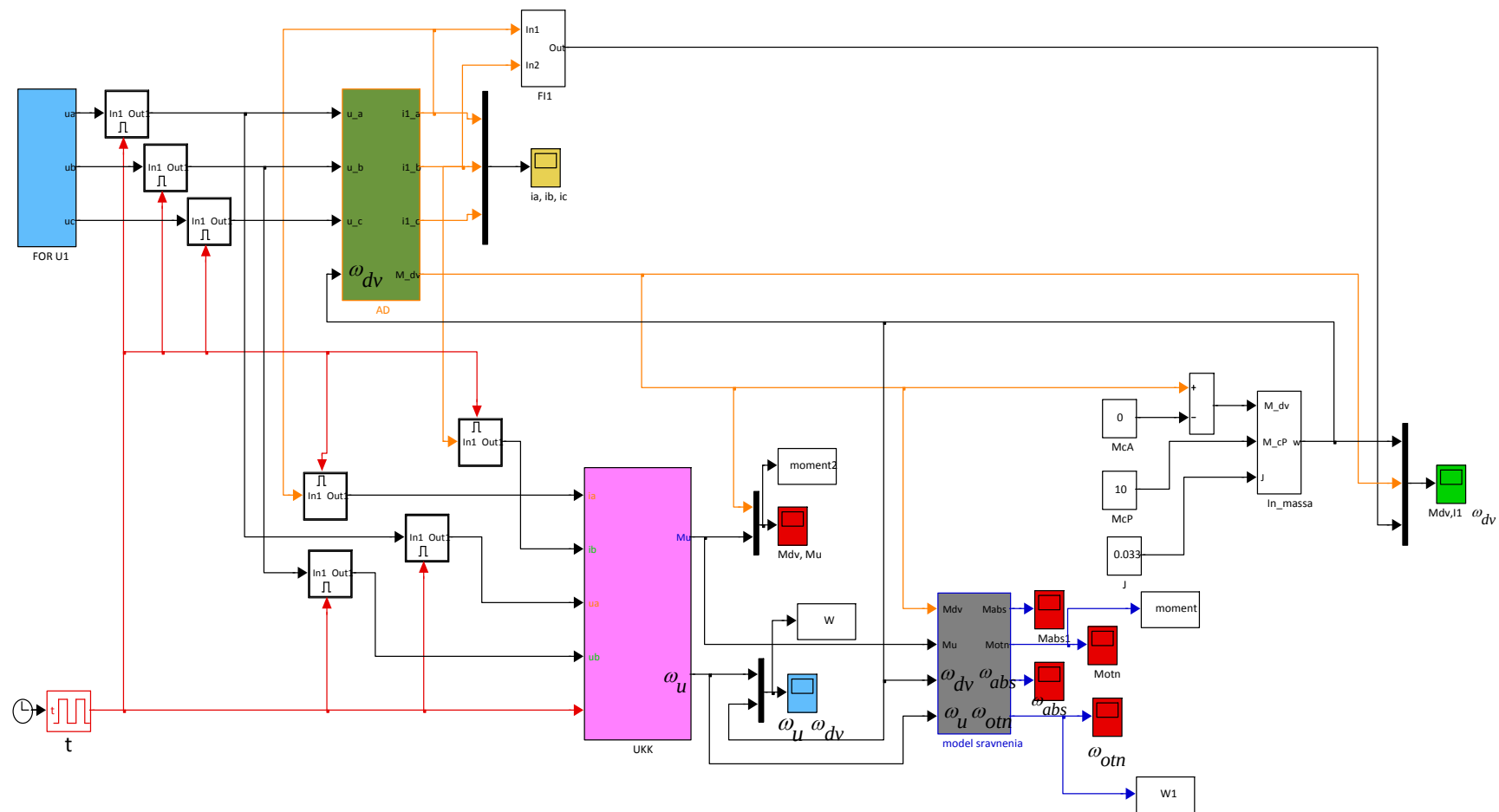


Рисунок 3.2.1 Имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания (АИР90L4)

Результаты имитационных исследований прямого пуска АД (АИР90Л4) с устройством косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом квантования по уровню и времени электромагнитного момента $M(t)$ и угловой скорости вращения $\omega(t)$ представлены на рисунках 3.2.2–3.2.3

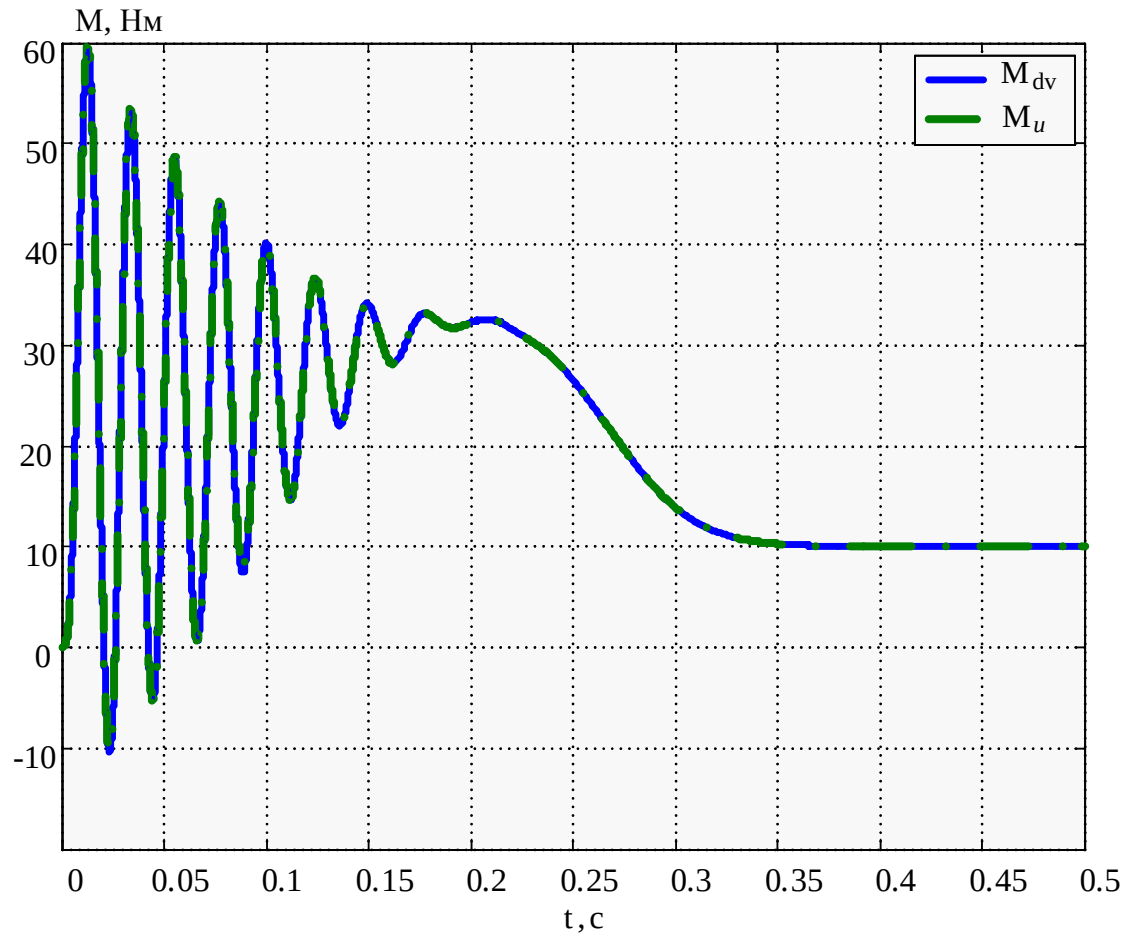


Рисунок 3.2.2 Характеристики $M(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания двигателя (прямой пуск при $f=50$ Гц, $M_c=10$ Нм)

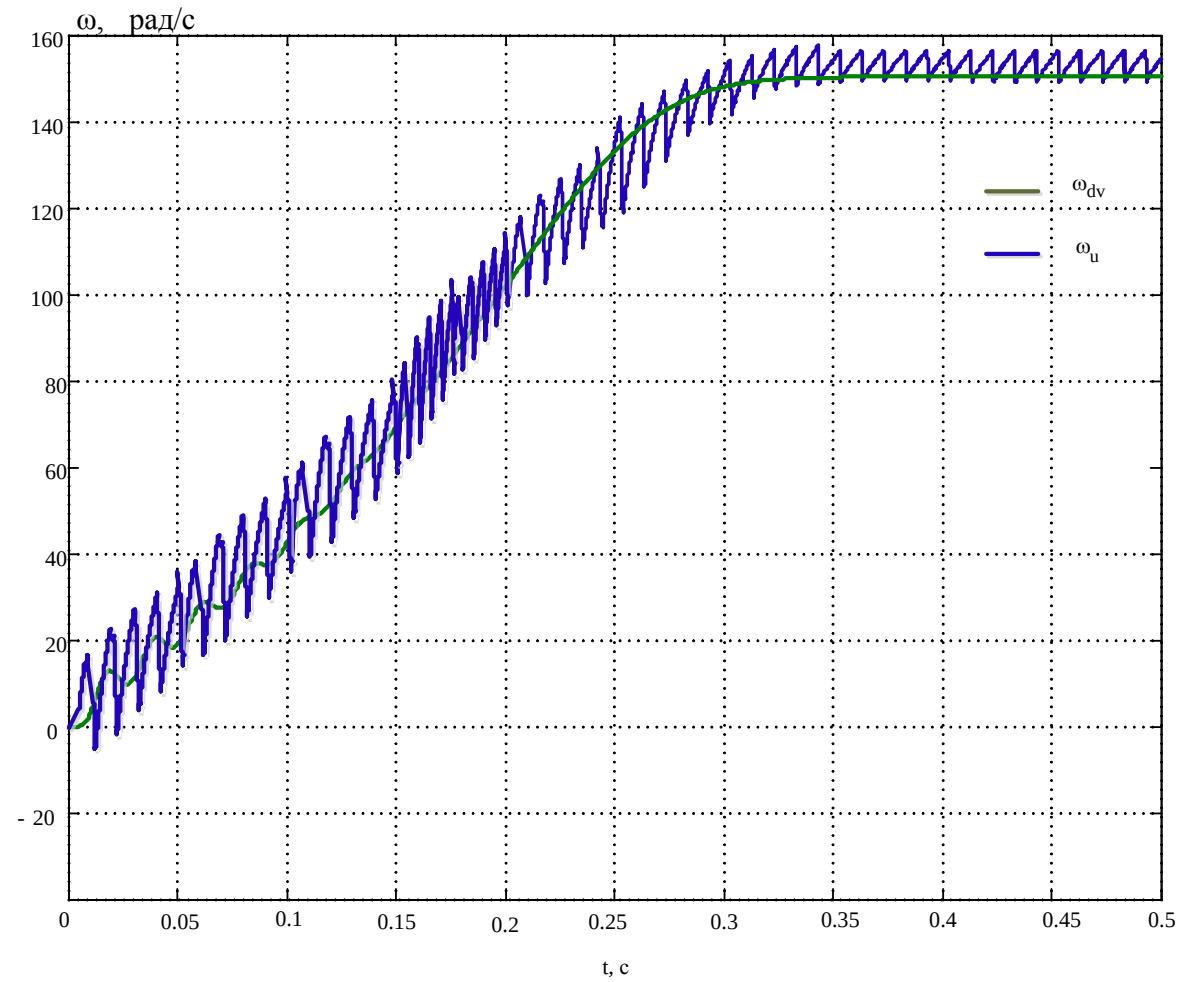


Рисунок 3.2.3 Характеристики $\omega(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания

Временные зависимости абсолютной и относительной погрешностей результатов имитационного моделирования приведены на рисунках 3.2.4–3.2.7, а их значения сведены в таблицу 3.2.1.

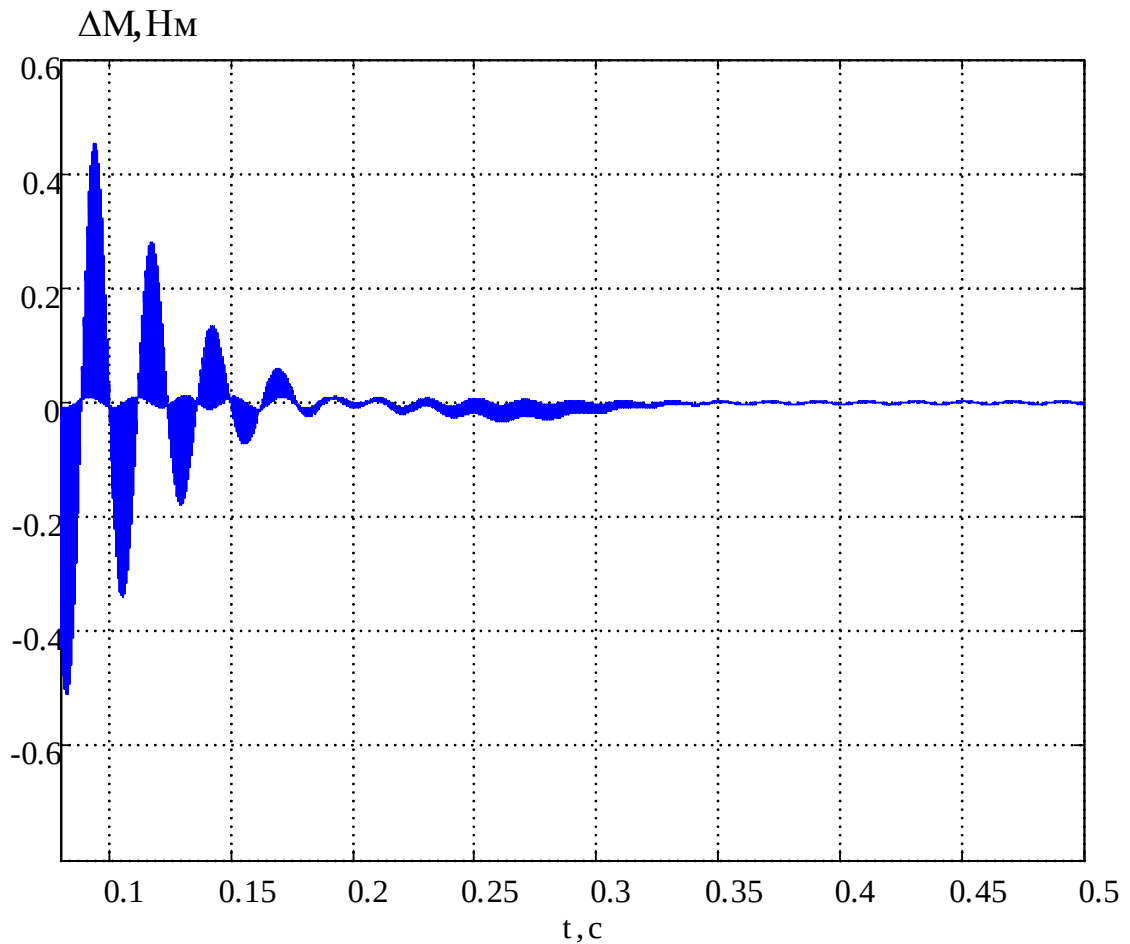


Рисунок 3.2.4 Временные зависимости абсолютной погрешности электромагнитного момента $\Delta M(t)$

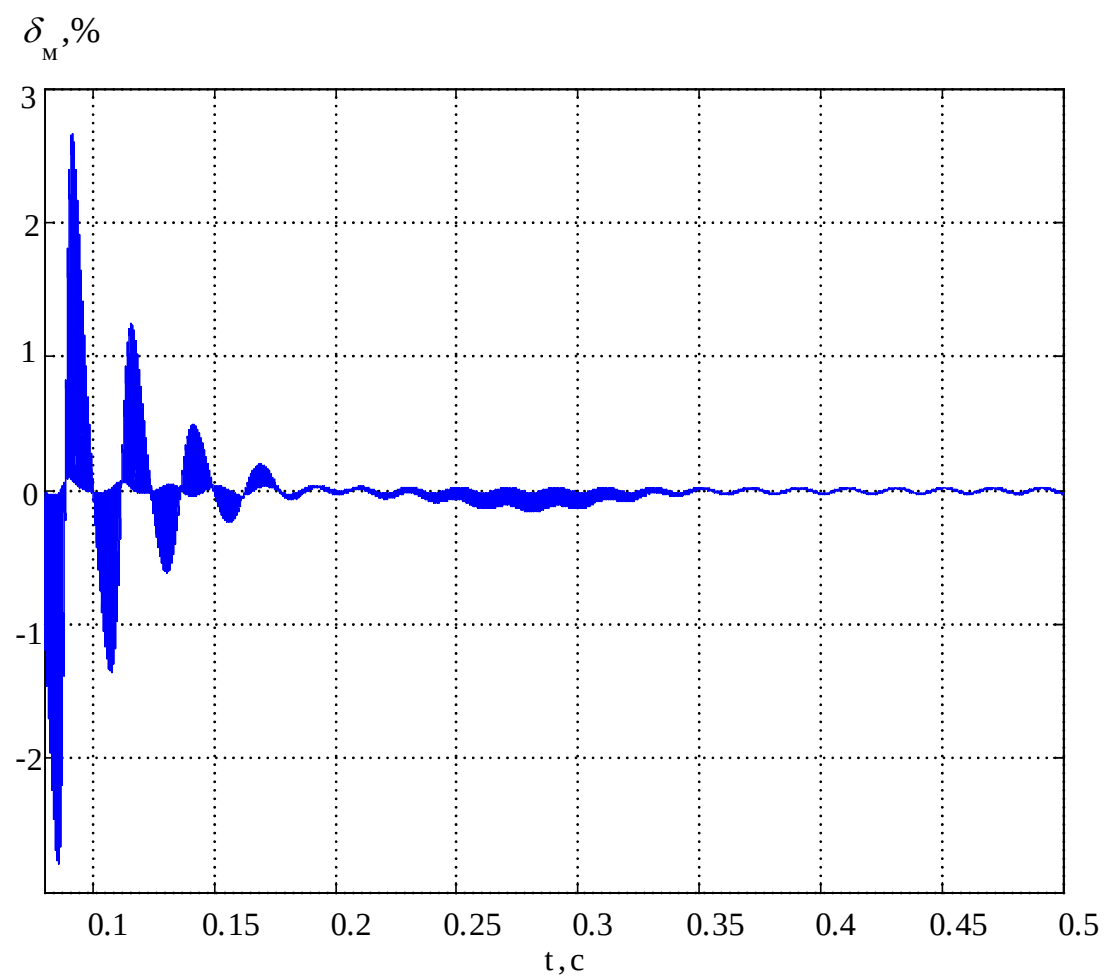


Рисунок 3.2.5 Временные зависимости относительной погрешности электромагнитного момента $\delta_M(t)$

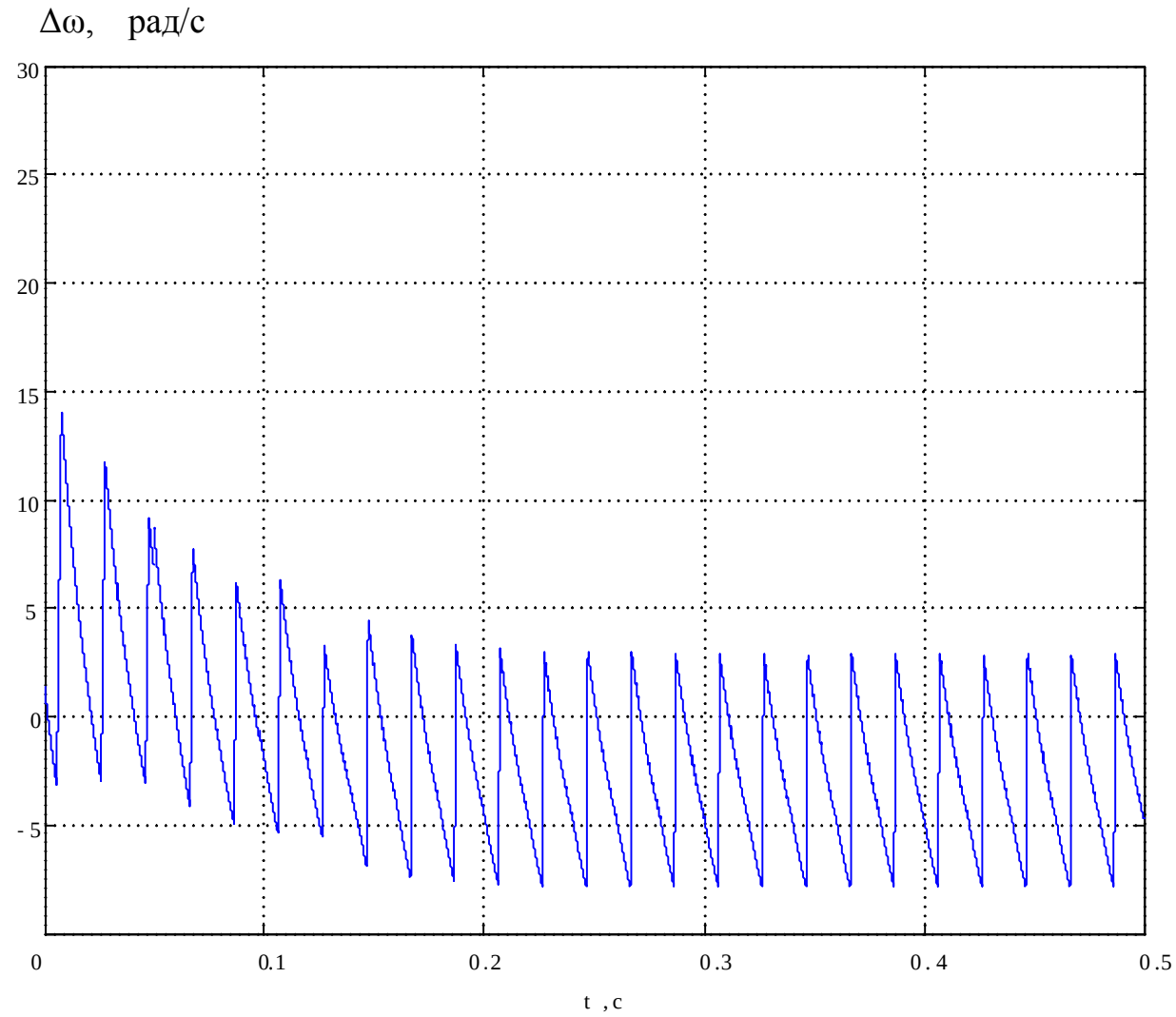


Рисунок 3.2.6 Временные зависимости абсолютной погрешности измерения угловой скорости $\Delta\omega(t)$

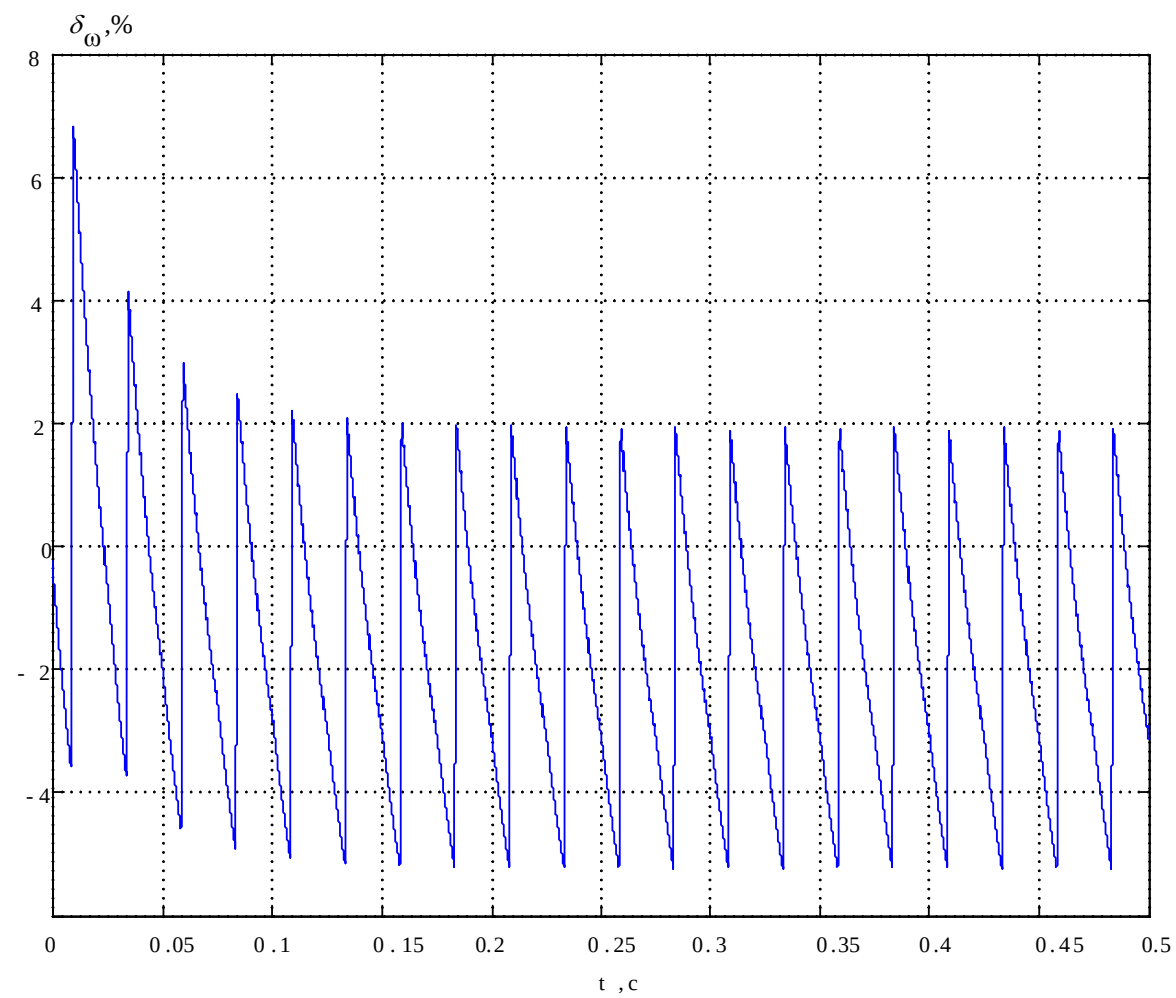


Рисунок 3.2.7 Временные зависимости относительной погрешности измерения угловой скорости $\delta_{\omega}(t)$

Таблица 3.2.1

Абсолютная и относительная погрешности электромагнитного момента и угловой скорости

Абсолютная погрешность		Относительная погрешность, %	
$\Delta M, \text{ М} \cdot \text{н}$	$\Delta \omega, \text{ рад/с}$	δ_M	δ_ω
-0.5...0,5	-8...10	-3...3	-5 ... +8

В результате сравнения значений момента и угловой скорости с АД и УСК, представленных в таблице 3.2.1, установлено, что относительная погрешность измерения электромагнитного момента в ЭП при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания двигателя составляет менее 3%, а угловой скорости менее 10%.

3.3 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ напряжения питания асинхронного двигателя

Для исследования имитационной модели АД с устройством косвенного контроля выходных механических переменных АД при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ напряжения питания двигателя была разработана схема, показанная на рисунке 3.3.1.

Схема содержит следующий элементы:

- суперблок модели АД (AD);
- суперблок модели преобразователя частоты, выполненная по схеме «неуправляемый выпрямитель – звено постоянного тока – инвертор напряжения» (DC/AC Converter) с частотой ШИМ инвертора $f_{\text{шим}}=5$ кГц (рисунок 3.3.2);
- суперблок модели задания входных величин напряжения (f1zad);

– суперблок модели формирователя фазных напряжений статорных обмоток в трехфазной системе координат. Поскольку управления трехфазным асинхронным двигателем формируется в двухфазной системе координат, в модели ЭП используются блоки прямого и обратного преобразования координат двигателя (FOR_U1);

– суперблок модели преобразователя координат (PK);

– суперблок модели преобразователя напряжения (PU);

– суперблок модели вычислителя действующего тока статора (FI1);

– суперблок модели инерционной массы (In_massa);

– устройство косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости (UКК);

– устройство сравнения (model sravnenia) значений электромагнитного момента и угловой скорости АД и с устройства косвенного контроля.

Исследование проводилось с АД типа АИР 90L4, данные которого приведены в таблице 3.1.1.

Результаты имитационных исследований прямого пуска АД представлены на рисунках 3.3.3 – 3.3.4 в виде зависимостей электромагнитного момента $M(t)$ и угловой скорости вращения $\omega(t)$. Графики абсолютной и относительной погрешностей определения электромагнитного момента и угловой скорости с АД и с устройства косвенного контроля приведены на рисунках 3.3.5 – 3.3.8, а их значения сведены в таблицу 3.3.1.

Таблица 3.3.1

Абсолютная и относительная погрешности электромагнитного момента и угловой скорости

Абсолютная погрешность		Относительная погрешность, %	
$\Delta M, 10^{-4}, Н \cdot м$	$\Delta \omega, \text{рад/с}$	$\delta_M, 10^{-3}$	δ_ω
-1.8...1.8	-10...10	-1.8...1.8	-7.5 ... +7.5

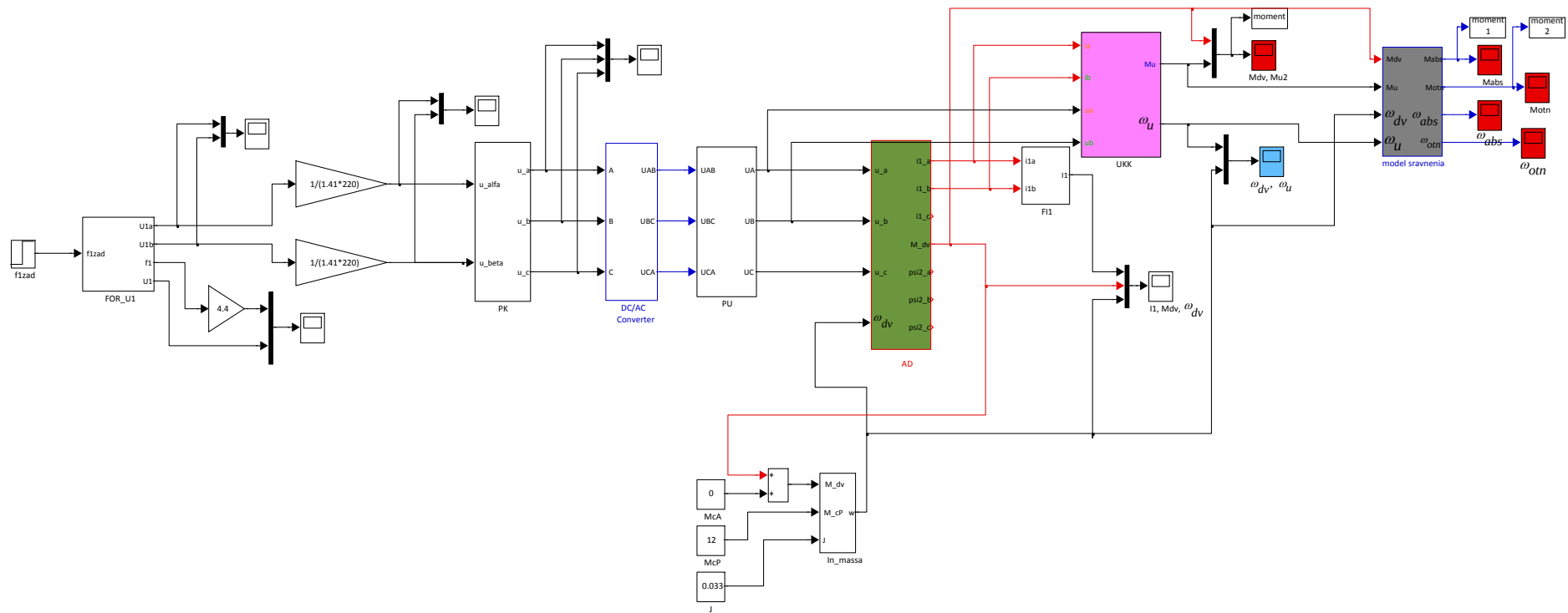


Рисунок 3.3.1 Имитационная модель АД (АИР 90L4) с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ

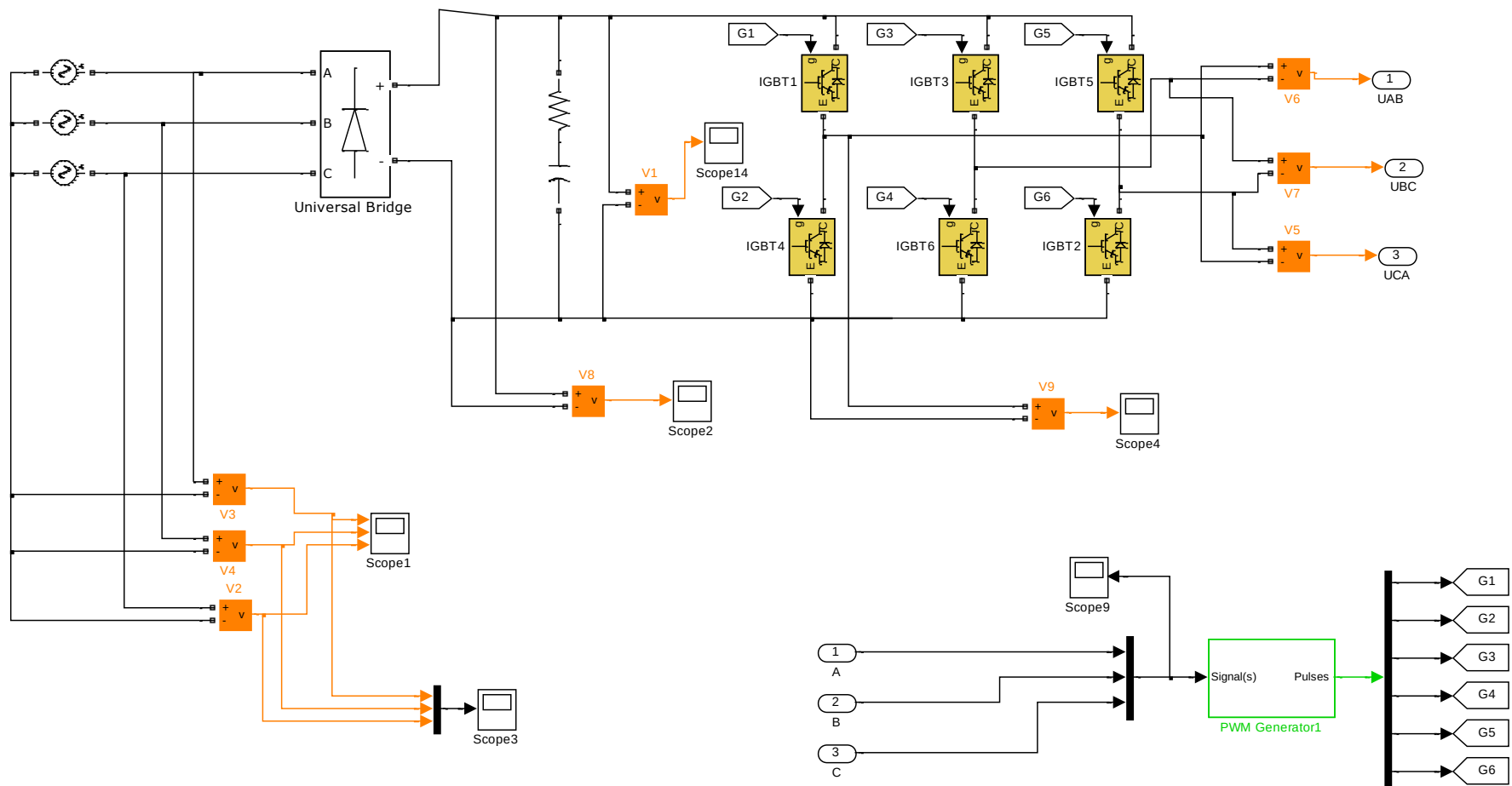


Рисунок 3.3.2 Имитационная модель преобразователя частоты

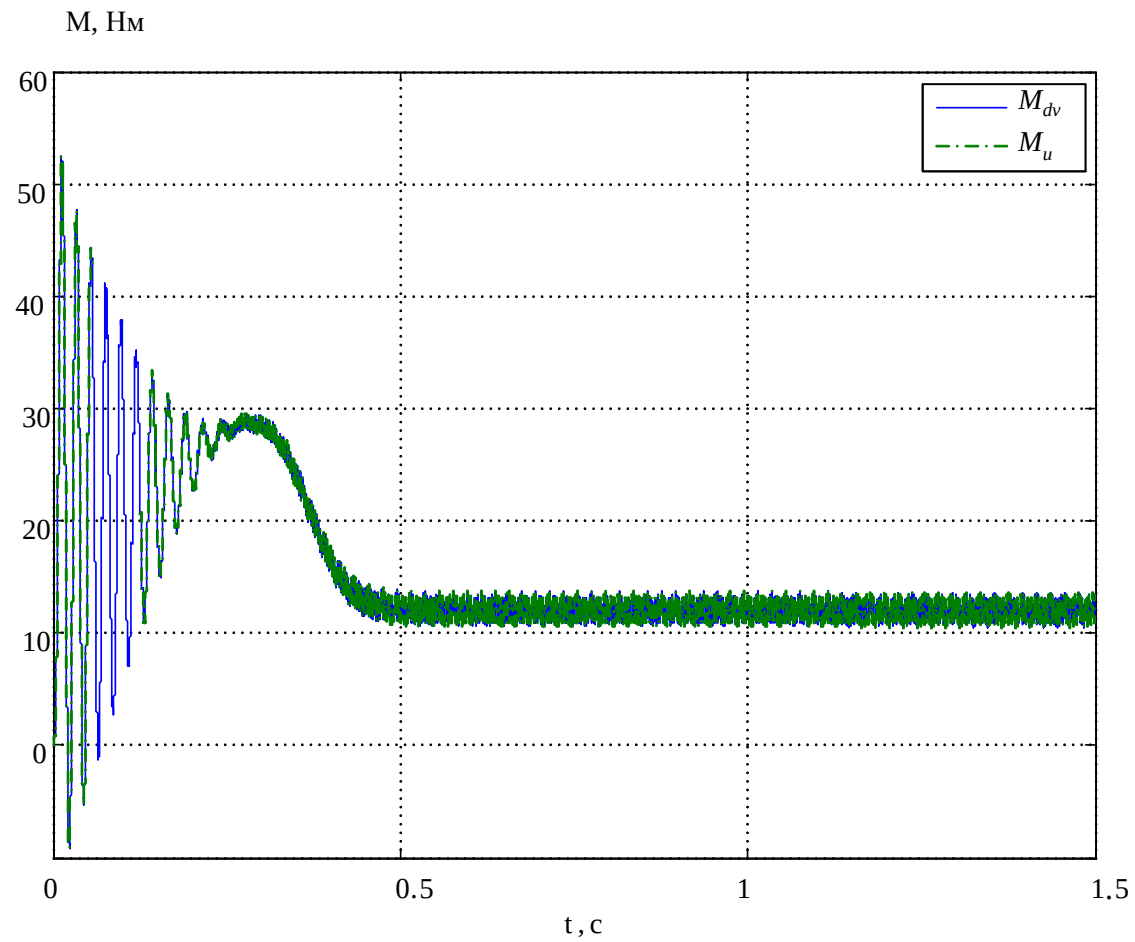


Рисунок 3.3.3 Характеристики $M(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ напряжения питания двигателя

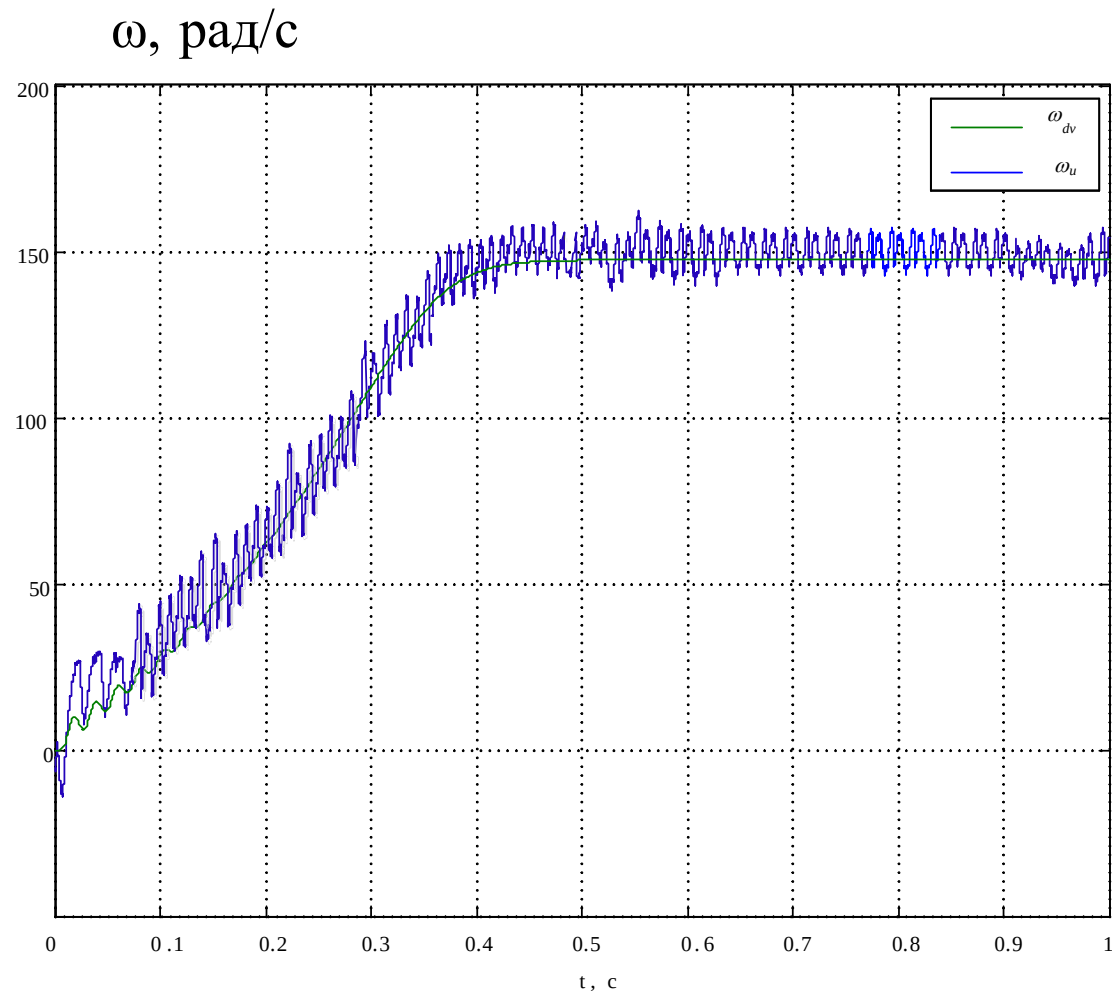


Рисунок 3.3.4 Характеристики $\omega(t)$, полученные с АД и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ напряжения питания двигателя

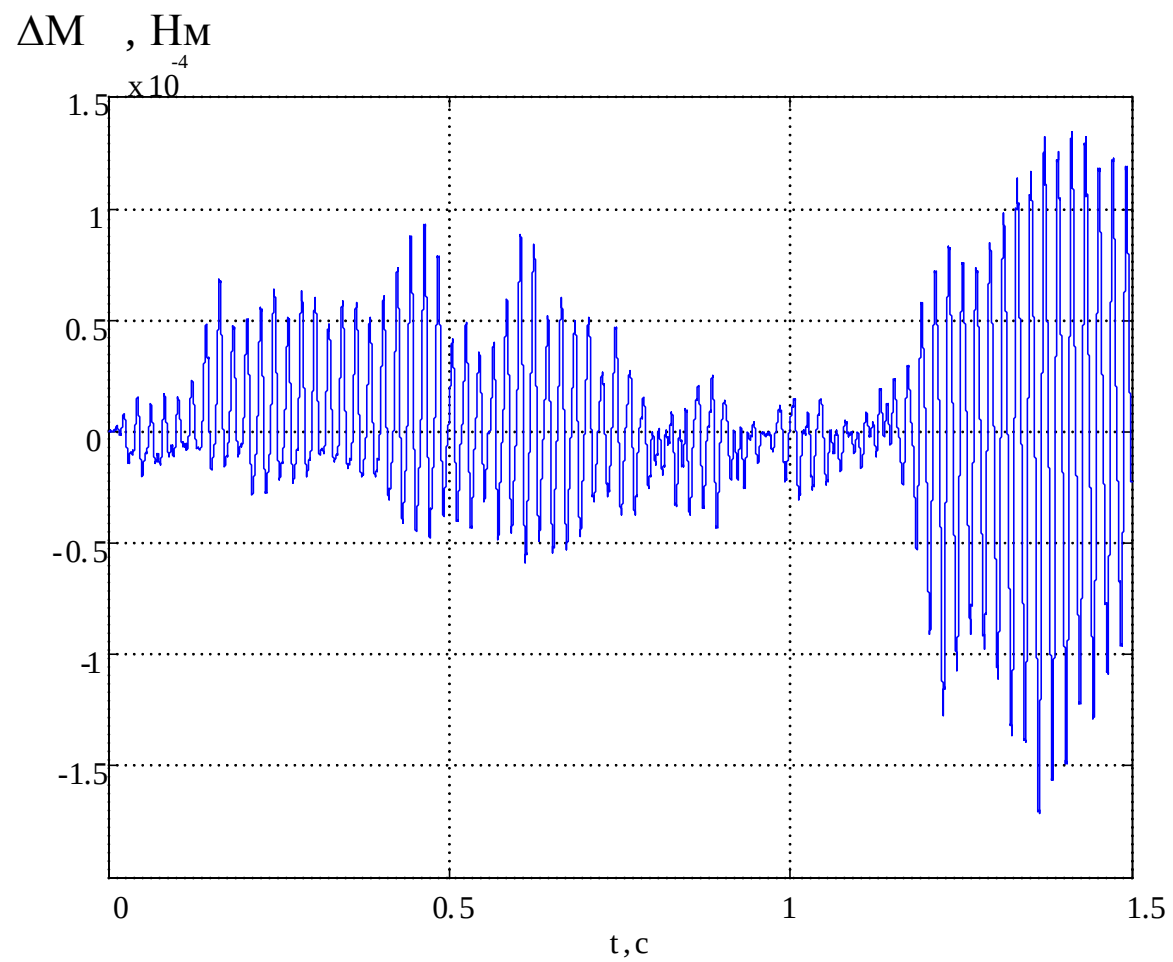


Рисунок 3.3.5 Временные зависимости абсолютной погрешности электромагнитного момента $\Delta M(t)$

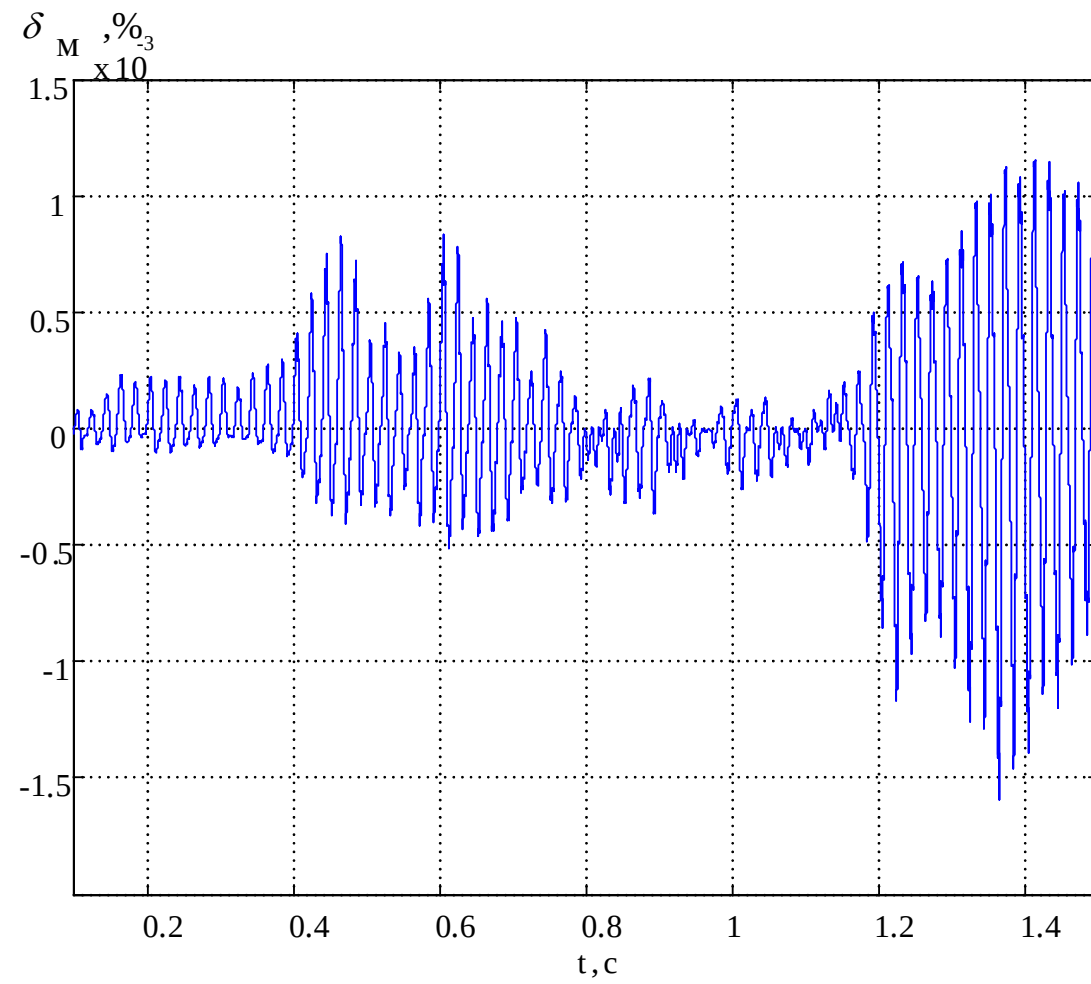


Рисунок 3.3.6 Временные зависимости относительной погрешности электромагнитного момента $\delta_M(t)$

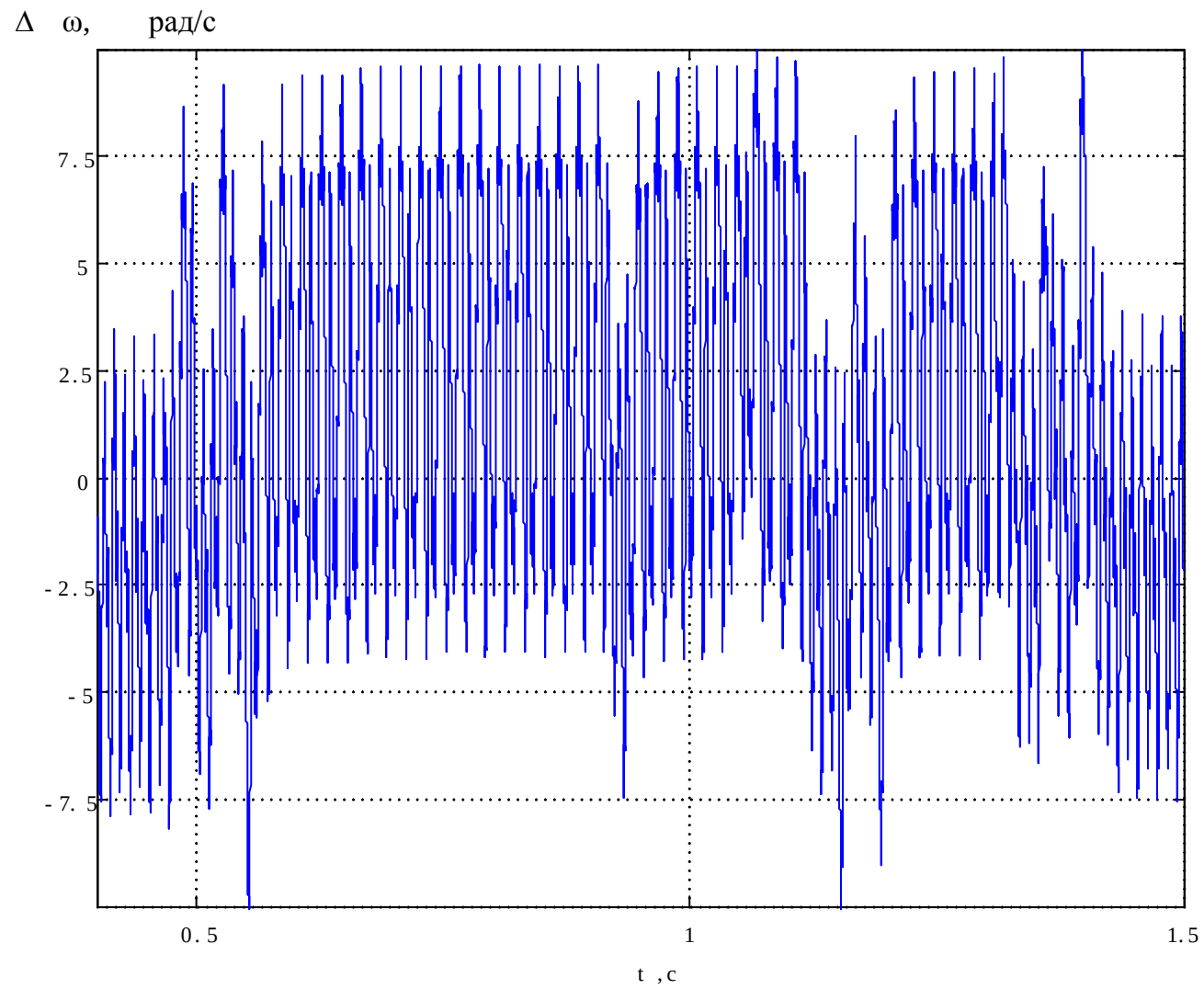


Рисунок 3.3.7 Временные зависимости абсолютной погрешности угловой скорости $\Delta\omega(t)$

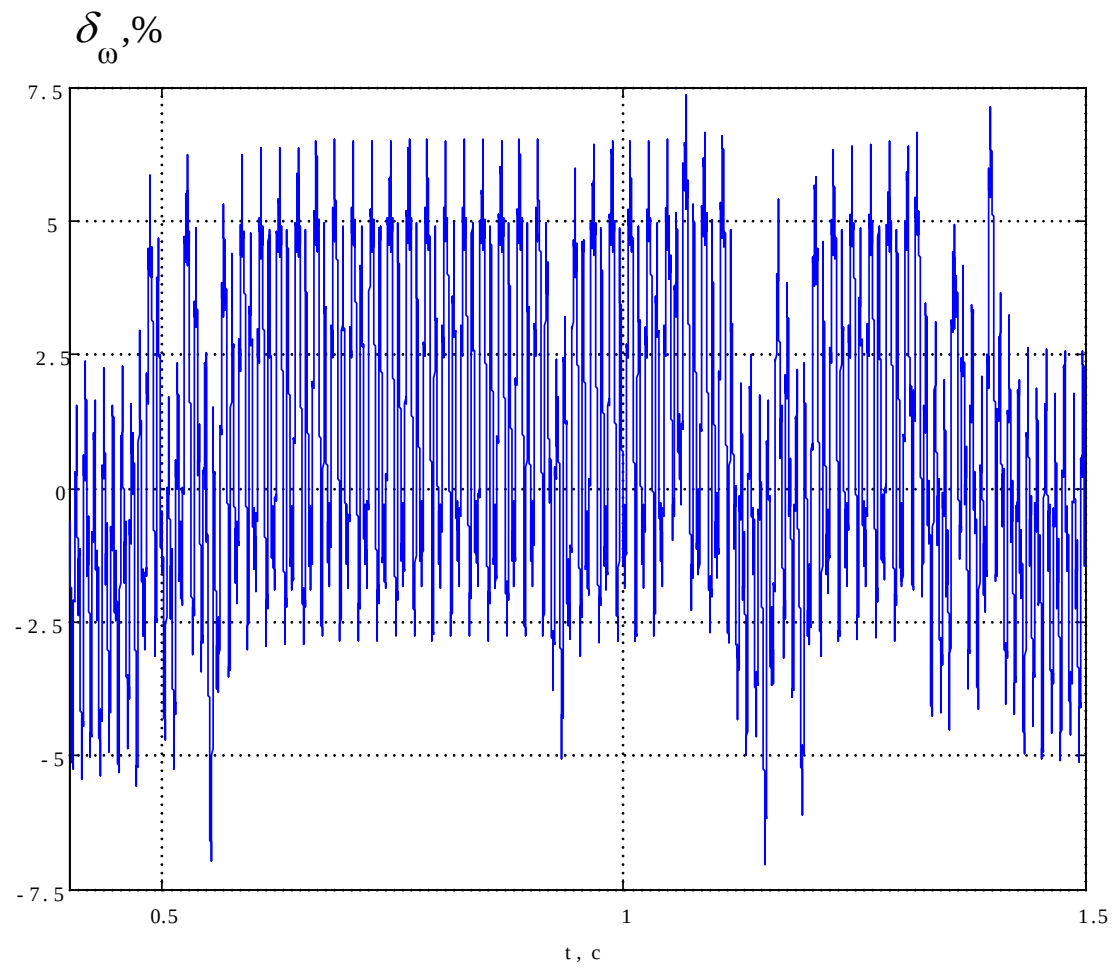


Рисунок 3.3.8 Временные зависимости относительной погрешности угловой скорости $\delta_{\omega}(t)$

Результаты сравнения полученных значений момента и угловой скорости с АД и УКК при проведении исследований на имитационной модели ЭП при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ, показывают, что относительная погрешность электромагнитного момента находится в пределах менее 1 %, а угловой скорости менее 8 %.

Схема имитационного моделирования контроля электромагнитного момента АД с устройством косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ для асинхронного двигателя (AB250S6) представлена на рисунке 3.3.9. Параметры двигателя AB250S6, используемые при моделировании, следующие: $P_{дв}=45$ кВт, $R_s = 0,071$ Ом, $R'_r = 0,045$ – сопротивления статора и ротора; $L_s = 20,784$ мГн, $L'_r = 21,001$ мГн, $L_{\mu} = 20,15$ мГн – индуктивности статора, ротора и магнитная индуктивность, $p_n=3$ – число пар полюсов. Исследования на имитационной модели ЭП при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ проводились для прямого пуска двигателя и установившегося режима работы без нагрузки.

В схеме рисунка 3.3.9 имеются следующие суперблоки:

- АД (AD); преобразователя частоты (Universal Bridge) с частотой ШИМ инвертора $f_{шим}=5$ кГц, разрядностью АЦП датчика тока $n_{ацп\ дт} = 10$; интервалом расчета в контуре тока 0,0002; числом импульсов датчика скорости на оборот 4000; интервалом расчета в контуре скорости 0,002;
- задания входных величин напряжения (Three phase programmable voltage source); задатчика интенсивности скорости (FORMIR_f1_zad);
- системы скалярного управления ЭП (SAU_SCAL_Rep);
- вычислителя действующего тока статора (FI1);
- инерционной массы (In_massa);
- устройства косвенного контроля электромагнитного момента (УКК);
- устройства сравнения (model sravnenia) полученных выходных механических переменных с АД и устройства косвенного контроля АД.

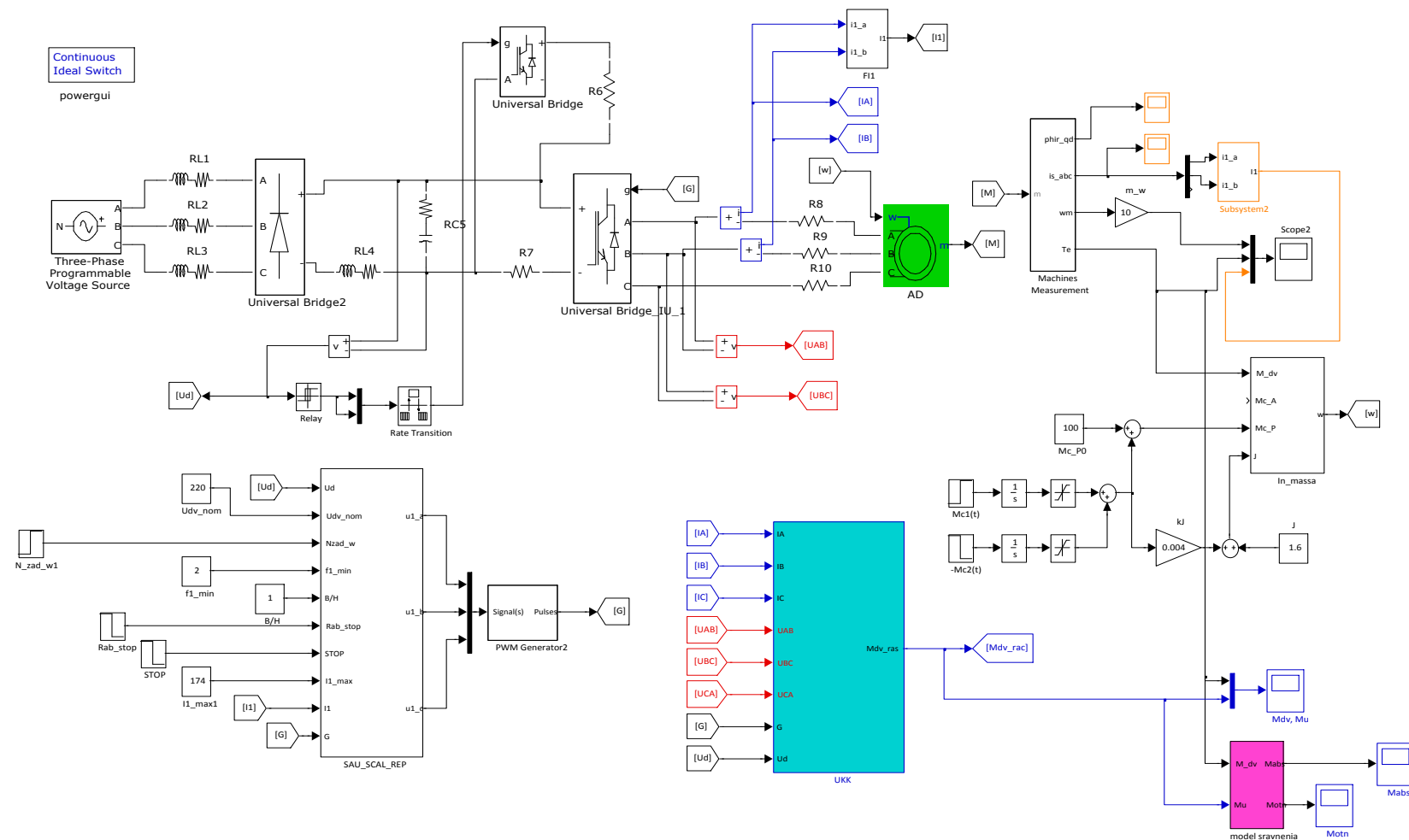


Рисунок 3.3.9 Имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ

Графики электромагнитного момента, полученных с АД и УСК при исследовании на имитационной модели ЭП при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ, приведены на рисунке 3.3.10.

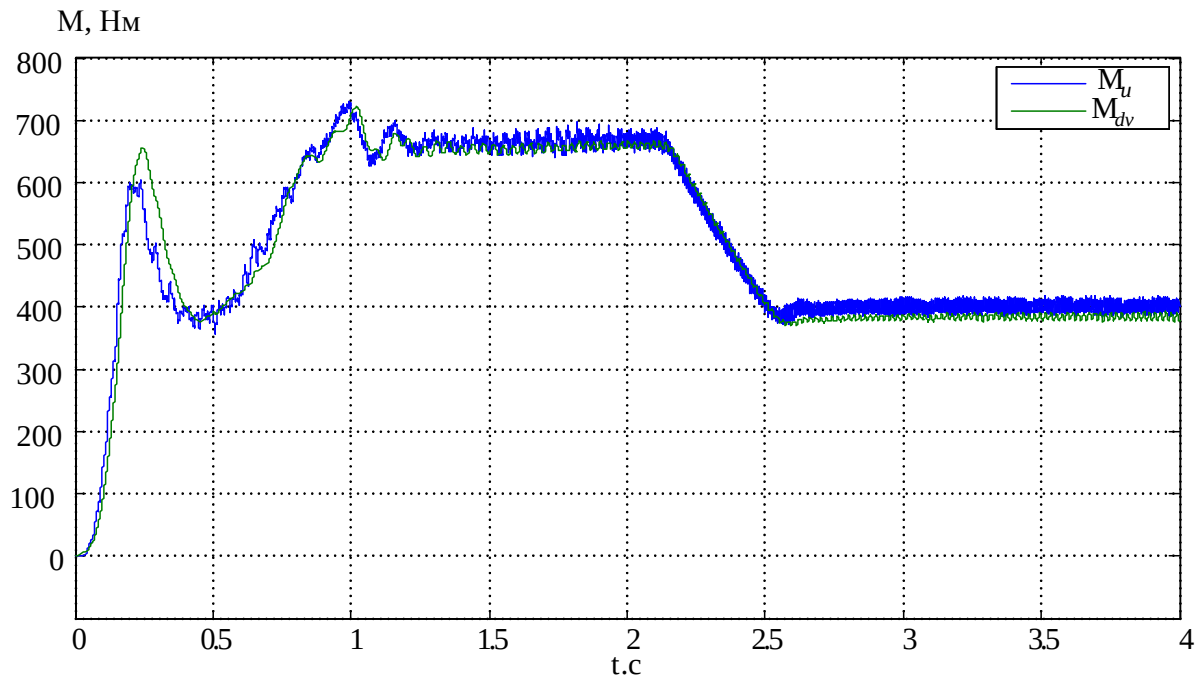


Рисунок 3.3.10 Характеристики $M(t)$ с АД (АВ250S6) и с устройства косвенного контроля в режиме пуска от задатчика скорости в электроприводе с частотным скалярным управлением с учетом ШИМ

Из характеристик момента $M(t)$ АД (АВ250S6) и с устройства косвенного контроля при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ следует, что расхождение между результатами значений момента с АД и с устройства косвенного контроля является незначительными, что говорит об адекватности математического описания АД с устройством косвенного контроля, представленного во второй главе.

Для оценки этого расхождения на рисунках 3.3.11 и 3.3.12 представлены временные зависимости абсолютной и относительной погрешностей электромагнитного момента АД с устройством косвенного контроля при

частотном скалярном управлении с учетом ШИМ, из которых видно, что погрешность электромагнитного момента с АД и с УКК составляет не более 10 %.

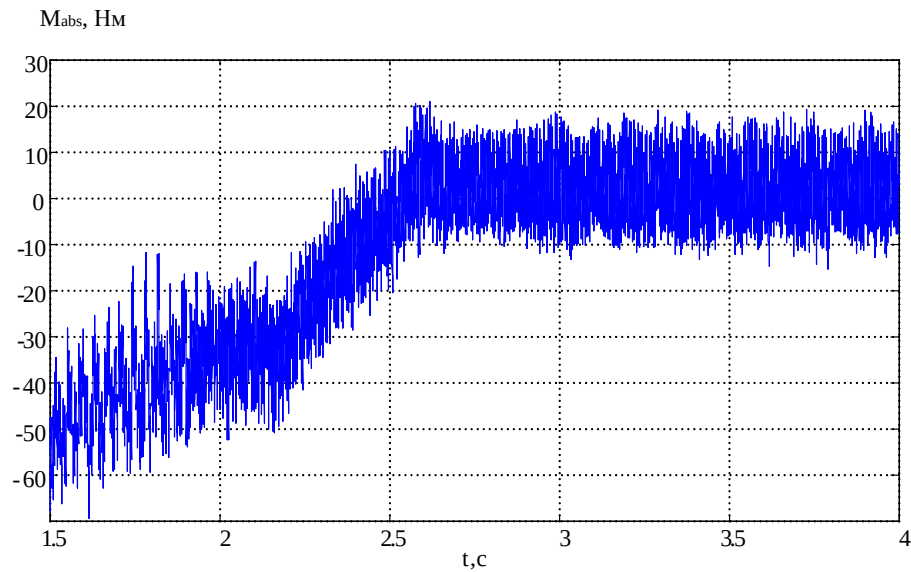


Рисунок 3.3.11 Временные зависимости абсолютной погрешности электромагнитного момента $\Delta M(t)$

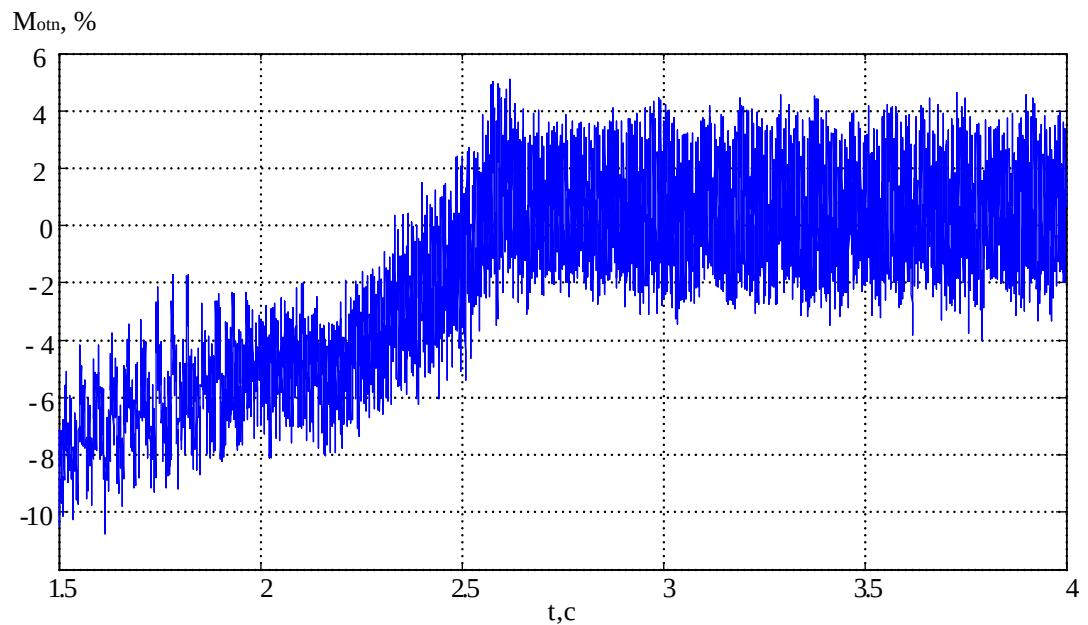


Рисунок 3.3.12 Временные зависимости относительной погрешности электромагнитного момента $\delta_M(t)$

3.4 Математическое моделирование электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости при частотном векторном управлении с учетом ШИМ напряжения питания асинхронного двигателя

На рисунке 3.4.1 приведена имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента АД в ЭП при частотном векторном управлении с учетом ШИМ для асинхронного двигателя (AB250S6).

При моделировании ЭП рассмотрен прямой пуск двигателя АД и установившийся режим работы без нагрузки, и моделирование осуществляется с постоянным шагом $\Delta t = 0.0001$ с.

Имитационная модель рисунка 3.4.1 содержит суперблоки основных устройств ЭП:

- АД (AD);
- преобразователь частоты (Universal Bridge) с частотой ШИМ инвертора $f_{\text{ШИМ}} = 5$ кГц, разрядностью АЦП датчика тока $n_{\text{ацп_дт}} = 10$; интервалом расчета в контуре тока 0,0002; числом импульсов датчика скорости на оборот 4000; интервалом расчета в контуре скорости 0,002;
- блок задания входных величин напряжения (Three phase programmable voltage source); задатчик интенсивности скорости (N_z_w1);
- 4-х контурная система автоматического векторного управления асинхронного электропривода (SAU_VECT_Rep);
- вычислитель действующего тока статора (FI1);
- инерционная масса (In_massa);
- устройство косвенного контроля электромагнитного момента АД (УКК);
- устройство сравнения (model sravnenia) полученных значений электромагнитного момента АД и с устройства косвенного контроля.

На рисунках 3.4.2–3.4.3 приведены графики моментов с АД и с УКК и относительных погрешностей при имитационном моделировании ЭП при частотном векторном управлении с учетом ШИМ.

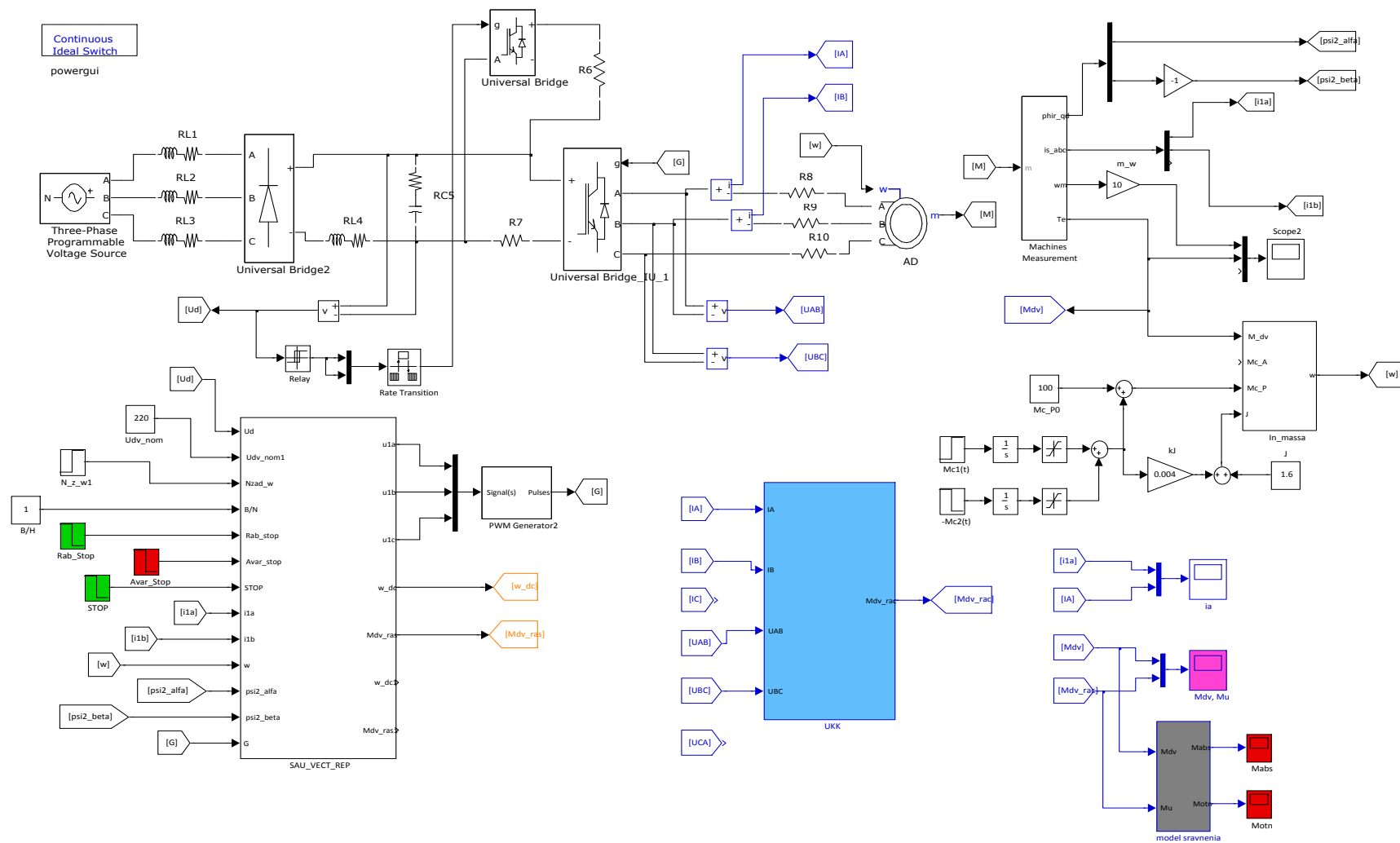


Рисунок 3.4.1 Имитационная модель АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента при частотном векторном управлении с учетом ШИМ

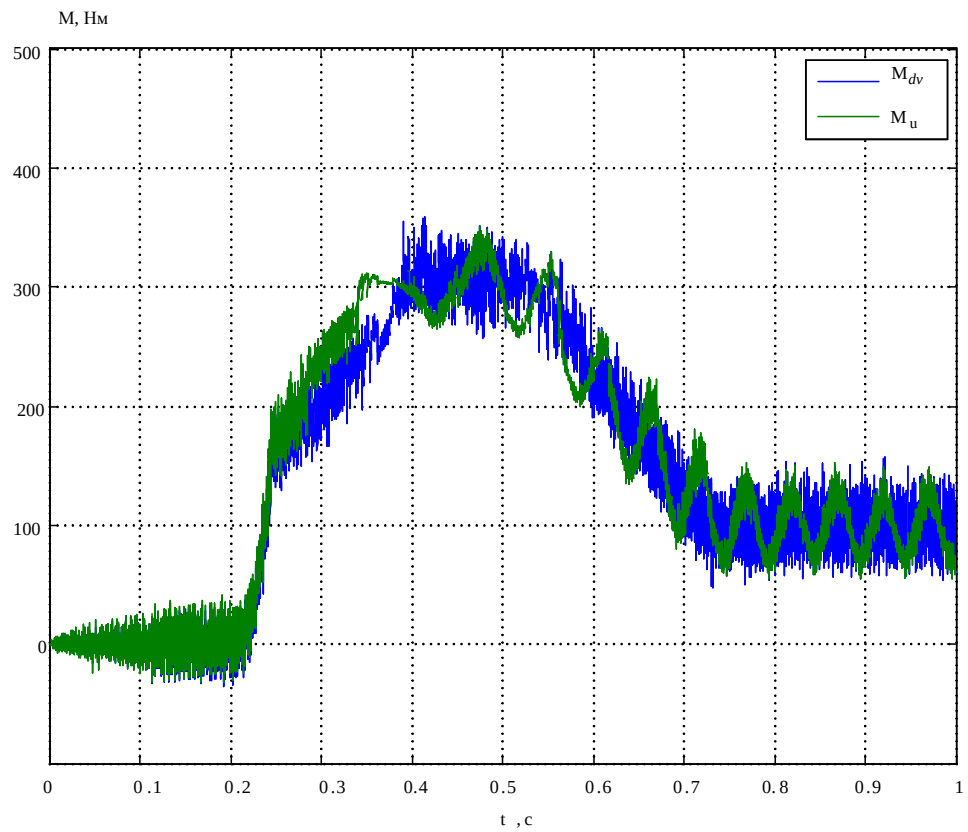


Рисунок 3.4.2 Характеристики $M(t)$, полученные с АД (АВ250S6) и с устройства косвенного контроля при частотном векторном управлении с учетом ШИМ

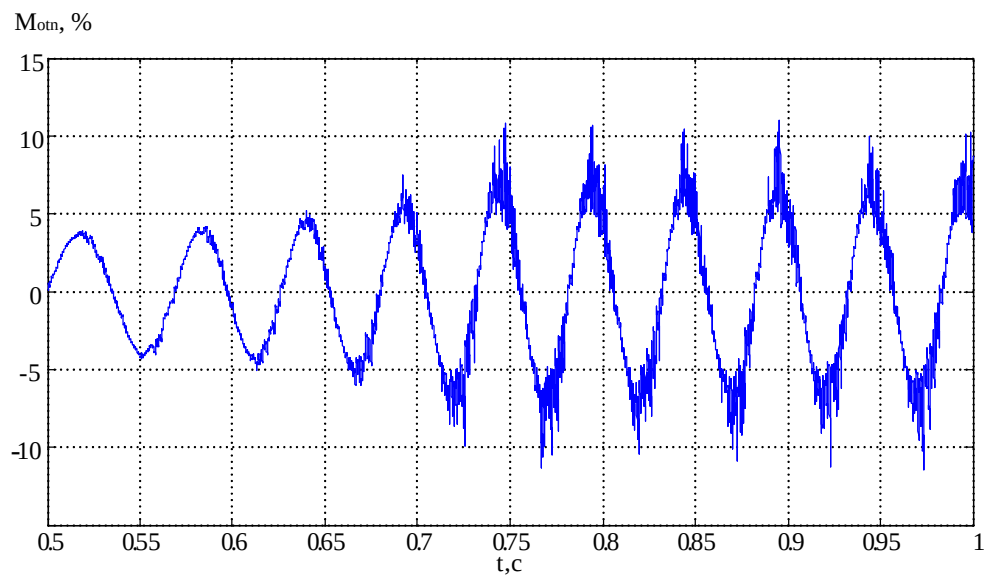


Рисунок 3.4.3 Временные зависимости относительной погрешности электромагнитного момента $\delta_M(t)$

Из представленных характеристик момента $M(t)$ с АД и с устройства косвенного контроля при частотном векторном управлении с учетом ШИМ видно, что величина относительной погрешности электромагнитного момента устройства косвенного контроля не превышает 10 %.

3.5. Выводы по главе

1. Результаты моделирования, полученные при исследовании частотно-управляемого ЭП с устройством косвенного контроля, подтверждают адекватность теоретических положений математического описания ЭП с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД.

2. Исследованиями, проведенными на моделях частотно-управляемого ЭП со скалярным управлением установлено, что применение устройства косвенного контроля выходных механических переменных АД в ЭП позволяет осуществлять контроль электромагнитного момента и угловой скорости с точностью не более 10 %.

3. Анализ результатов значений погрешностей электромагнитного момента и угловой скорости устройства косвенного контроля АД в частотно-регулируемом ЭП со скалярным управлением показал, что относительная погрешность электромагнитного момента составляет менее 5%, а угловой скорости не превышает 10 % из-за наличия корректирующего звена в блоке вычисления угловой скорости.

4. Установлено, что точность измерения электромагнитного момента и скорости в ЭП с частотно-скалярным управлением не зависит от типа применяемого АД и от учета ШИМ напряжения питания двигателя. Показано, что расхождение результатов вычисления электромагнитного момента и угловой скорости на выходе с АД и с устройства косвенного контроля составляет менее 10 %.

5. Проведенные исследования на имитационной модели ЭП с частотно–векторным управлением АД с устройством косвенного контроля установлено, что величина относительной погрешности результатов определения электромагнитного момента, полученного на выходе АД и устройства косвенного контроля не превышает 10 %, что подтверждает высокую эффективность применения устройства косвенного контроля для ЭП общепромышленных механизмов, требующих непрерывного контроля момента двигателя.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УСТРОЙСТВОМ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

4.1. Описание экспериментальной установки

Для проверки разработанных способов косвенного контроля выходных механических переменных АД было проведено экспериментальное исследование на специальном стенде.

Стенд включает в себя трехфазный источник питания, испытуемый электродвигатель, цифровой мультиметр, блоки момента и скорости, преобразователя переменного тока с блоком измерения QMS1.1, нагрузочный генератор постоянного тока, пуско–защитный коммутационный блок, датчики тока и напряжения, датчик частоты вращения ротора и персональный компьютер с многоканальным аналого–цифровым преобразователем, а также специальное программное обеспечение.

Трехфазный источник питания предназначен для питания блоков управления АД трехфазным напряжением 380 В, а также всех блоков однофазным напряжением 220 В.

Блок цифрового мультиметра включает в себя цифровой мультиметр DMG800 и датчики, которые позволяют измерять токи, напряжения, мощность, $\cos\varphi$, гармонический состав токов и напряжений и другие параметры электрической сети переменного тока, подключенной к блоку.

Блок индикации момента и скорости выполняют индикацию текущих значений момента и скорости на валу двигателя.

Блок преобразователя переменного тока с блоком измерения QMS1.1. содержит датчики тока и напряжения, предназначенные для подключения к блоку АЦП.

Блок преобразователя включает в себя:

- трёхфазный автоматический выключатель;
- блок ручного управления;
- трёхфазный мостовой преобразователь частоты с выпрямителем и звеном постоянного тока;

- тормозной резистор;
- выходной синусоидальный RC-фильтр;
- выход на асинхронный двигатель.

Выходной фильтр состоит из трёх дросселей индуктивностью 1.6/3.1 мГн каждый, и трёх конденсаторов ёмкостью 20 мкФ/400 В каждый.

Блок измерения QMS1.1 включает в себя:

- 16-ти канальный модуль аналого-цифрового преобразования с USB-интерфейсом QMS10;

- датчики тока (25 А);
- датчики напряжения (500 В);
- вспомогательный блок питания +24В, +15В, -15В.

Блок АЦП QMS10 передаёт оцифрованные сигналы на компьютер. Прилагаемая компьютерная программа позволяет наблюдать осциллограммы сигналов, и сохранять данные в виде массива для последующей обработки.

Блок преобразователя постоянного тока с блоком измерения QMS1.2.

Блок преобразователя включает в себя:

- трёхфазный автоматический выключатель;
- блок ручного управления;
- понижающий силовой трансформатор 380В/208В;
- трёхфазный мостовой преобразователь частоты с выпрямителем и звеном постоянного тока;

- источник питания возбуждения 220В;
- тормозной резистор;
- выход на двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

Блок измерения QMS1.2 включает в себя:

- датчики тока (25 А);

– датчики напряжения (500 В).

Применимые типы датчиков: тензометрические датчики (мост 120 Ом, 350 Ом, 700 Ом).

При экспериментальных исследованиях использовался асинхронный двигатель типа АИР71В2У3 мощностью $P_n = 1,1$ кВт, с номинальной частотой вращения $n_n = 3000$ об/мин, номинальным напряжением $U_{n1} = 220$ В, $R_s = 5,6$ Ом.

На рисунке 4.1.1 представлен общий вид экспериментального стенда и его компонентов.

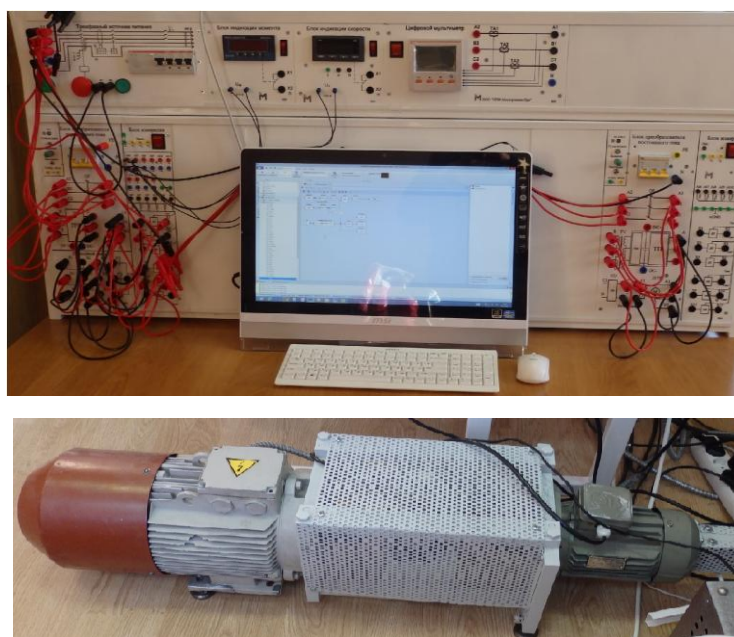


Рисунок 4.1.1 Экспериментальный стенд и его компоненты

Обработка данных производилась на персональном компьютере в программной среде MatLab с использованием программного продукта Mex Bios со встроенным набором сервисов для управления электродвигателями.

Mex Bios – это визуальная среда разработки и моделирования встроенного программного обеспечения систем управления электродвигателями, технологическими комплексами, программируемыми логическими контроллерами, которая позволяет создавать собственные программы управления электродвигателями, технологическими комплексами, выполнять моделирование

работы программы и электромеханических объектов и систем; производить отладку программы загруженной в микроконтроллер; устанавливать библиотеки компонентов для новых микроконтроллеров.

Для уменьшения погрешностей при определении электромагнитного момента и угловой скорости была проведена серия экспериментальных исследований. Серийные приборы, применяемые в экспериментальной установке, поверены и соответствуют нормам точности.

4.2 Результаты экспериментального исследования

С целью проверки полученных способов контроля электромагнитного момента и угловой скорости был проведен ряд экспериментов с асинхронным двигателем типа АИР71В2У3 мощностью $P_n = 1,1$ кВт и синхронной частотой вращения $n_0 = 3000$ об/мин.

На рисунке 4.2.1 представлена общая схема имитационной модели, выполненная в программной среде MatLab, позволяющая определить значения электромагнитного момента и угловой скорости, полученных с реального электродвигателя и с УКК АД.

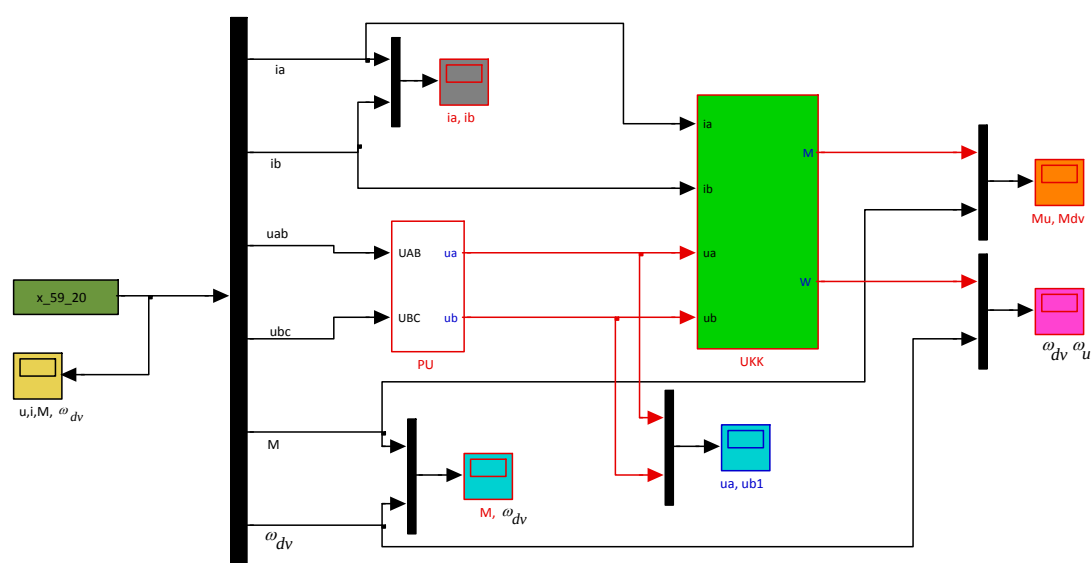


Рисунок 4.2.1 Общая схема имитационной модели с УКК АД

Схема содержит блок с базой данных, полученных в ходе экспериментов, и блок УКК АД. Результаты проведенных исследований на экспериментальной установке (для АД типа АИР71В2У3) приведены на рисунках 4.2.2 и 4.2.3.

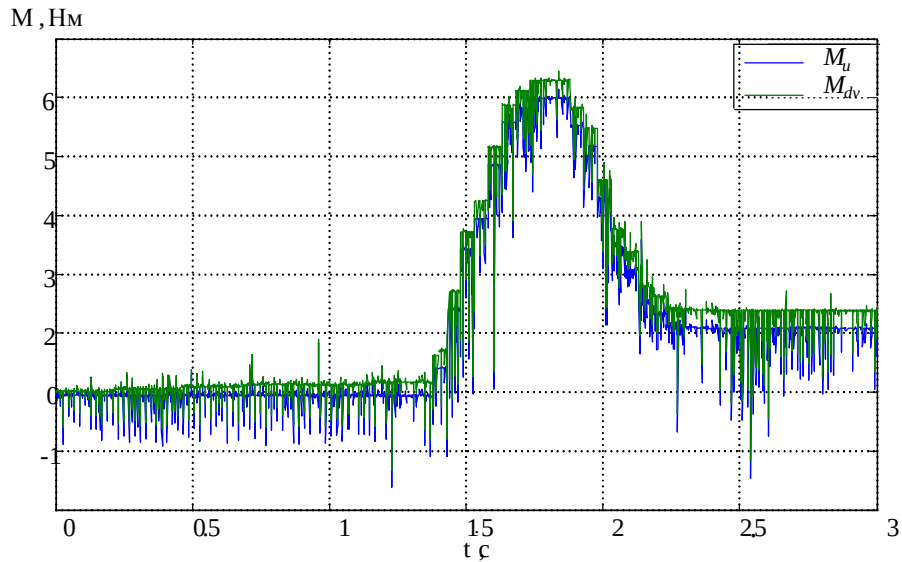


Рисунок 4.2.2 Графики момента с двигателя M_{dv} и устройства косвенного контроля M_u

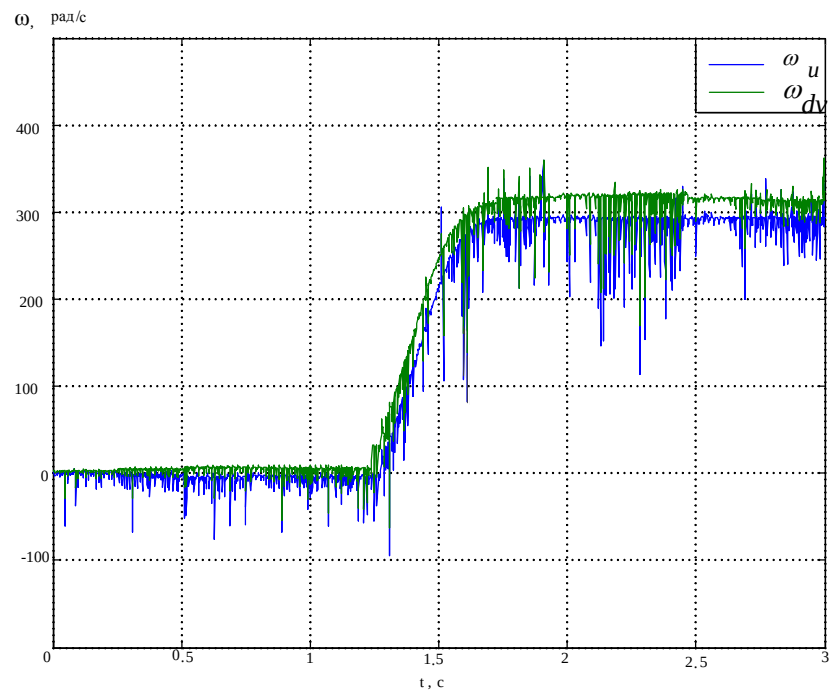


Рисунок 4.2.3 Графики скорости с двигателя ω_{dv} и устройства косвенного контроля ω_u

Анализ графиков электромагнитного момента и угловой скорости, полученной на экспериментальной установке, показывает, что расхождение между полученными графиками момента и скорости с реального электродвигателя и УКК АД составляют не более 10 %, что подтверждает адекватность математического описания АД с разработанным устройством косвенного контроля выходных механических переменных асинхронного двигателя для электроприводов общепромышленных механизмов.

4.3 Выводы по главе

1. Полученные результаты экспериментальных исследований на лабораторном стенде подтверждают адекватность теоретических положений математического описания ЭП с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД.

2. Использование в экспериментальных исследованиях визуальной среды Mex Bios позволяет проводить проектирование, предварительное имитационное моделирование, отладку встроенного программного обеспечения, настройку регуляторов цифровой системы управления электродвигателя в одном продукте, что является достоинством экспериментального стенда.

3. Установлено, что расхождение полученных значений электромагнитного момента и угловой скорости на выходе АД и устройства косвенного контроля на экспериментальном стенде при моделировании не превышает 10 %, что допустимо в инженерных расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам, проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель электропривода с устройством косвенного контроля выходных механических переменных асинхронного двигателя, обеспечивающая непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости в электроприводе общепромышленного назначения.

2. Предложены аналитические зависимости математического описания асинхронного электродвигателя с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости, позволяющие с заданной точностью рассчитать значения и проводить контроль выходных механических переменных в электроприводе.

3. Для обеспечения требуемой точности контроля выходных механических переменных АД в аналитических зависимостях математического описания электропривода с устройством косвенного контроля предложено исключить интегральную составляющую переходом в ортогональную пару, используя преобразования Фурье, Эйлера, Парсеваля.

4. Разработаны алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, которые позволяют проводить контроль выходных механических переменных асинхронного двигателя с повышенной точностью, и отличаются от известных простотой реализации схемных решений.

5. Исследованиями, проведенными на моделях частотно-управляемого ЭП со скалярным и векторным управлениями установлено, что применение устройства косвенного контроля асинхронного двигателя в электроприводе позволяет осуществлять контроль электромагнитного момента и угловой скорости с точностью не более 10 %. Результаты моделирования, полученные при исследовании частотно-управляемого электропривода с устройством косвенного контроля, подтверждают адекватность теоретических положений

математического описания электропривода с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя.

6. Установлено, что точность контроля электромагнитного момента и скорости в электроприводе с частотно-скалярным управлением не зависит от типа применяемого асинхронного двигателя и от учета ШИМ напряжения питания двигателя. Показано, что расхождение результатов измерения электромагнитного момента и угловой скорости с выхода асинхронного двигателя и устройства косвенного контроля составляет менее 10 %.

7. Полученные результаты экспериментальных исследований на лабораторном стенде подтверждают адекватность теоретических положений математического описания АД с устройством косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости в ЭП. Установлено, что значения электромагнитного момента и угловой скорости на лабораторном стенде реального АД и с устройства косвенного контроля имеют сходимость допустимую в инженерных расчетах, а значения погрешностей составляют не более 10 %.

Список использованных источников

1. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение / Н. Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1974. – 480 с
2. Ануфриев, И. Е. Matlab 7 / А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 1104 с.
3. Арион, В.Д. Применение динамического программирования к задачам электроэнергетики / В.Г. Журавлев. – Кишинев: Штиинца, 1981. – 133 с.
4. Архипцев, Ю.Ф. Асинхронные электродвигатели / Н.Ф. Котеленец. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 105 с.
5. Башарин, А.В. Управление электроприводом / В.А. Новиков, Г.Г.Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. Боднер, В.А. Измерительные приборы / А. В.Алферов. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 224 с.
7. Браславский, И.Я. К построению САР скорости на основе системы ТПН-АД без тахогенераторных датчиков / А. М. Зюзев, Д. Г. Тимофеев // Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями: тезисы докладов научно-технической конференции, Екатеринбург, 1992. – 9 – 10 с.
8. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
9. Бородацкий, Е.Г. Разработка системы управления взаимосвязанным электроприводом центробежных турбомеханизмов станции перекачки жидкости: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 /Евгений Геогиевич Бородацкий. – Омск, 1999. – 161 с.
10. Букреев, В.Г. Способ оптимальной оценки частоты вращения асинхронного двигателя и система для его реализации / В.С. Лаходынов, Д.С. Аксенов // Патент России №2385529. – 2010.

11. Вержбицкий, В.М. Численные методы: Математические методы и обыкновенные дифференциальные уравнения / В.М. Вержбицкий. – М.: Оникс 21 век, 2005. – 400 с.
12. Виноградов, А.Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердлов, А.Н. Сибирцев // Электротехника. – 2003. – № 7. – с. 7-17.
13. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока / В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
14. Галеев, В.Б. Магистральные нефтепродуктопроводы / М.З. Каркачев, В.И. Харламенко. – М.: Недра, 1988. – 295 с.
15. Герман–Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С.Г. Герман–Галкин. – Санкт–Петербург: Корона–Принт, 2001. – 320 с.
16. Глазырин, А.С. Способ определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя / Р.Ю. Ткачук, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев, Д.В. Гречушников, С.В. Ланграф // Патент России №2476983, бюл. 6. – 2013.
17. Гольдберг, О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг. – М.: Энергия, 1968. – 176 с.
18. Гольдберг, О.Д. Автоматизация контроля параметров и диагностики асинхронных двигателей / И. М. Абдуллаев, А. Н. Абиев – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
19. Гультияев, А. Визуальное моделирование в среде MATLAB / А. Гультияев. – СПб.: Питер, 2000. – 429 с.
20. Гультияев, А. Имитационное моделирование в среде Windows / А. Гультияев. – Санкт-Петербург: Корона принт, 1999. – 287 с.
21. Данку, А. Электрические машины / А. Фаркаш, Л. М. Надь. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 306 с.
22. Дементьев, Ю. Н. Алгоритм и способ измерения крутящего момента двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова// Материалы

XIX Международной научно-практической конференции молодых ученых “Современные техника и технологии», Томск, 2013. – с. 355–356.

23. Дементьев, Ю. Н. Алгоритм и способ измерения угловой скорости вращения двигателя в асинхронном электроприводе / А.Д. Умурзакова, К. В. Хацевский // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – с. 393–396.
24. Дементьев, Ю. Н. Алгоритм контроля угловой скорости двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока – 2013. – № 1. – с. 270 – 272.
25. Дементьев, Ю. Н. Измерение механических координат двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова, О. В. Арсентьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 7. – с. 127–132.
26. Дементьев, Ю. Н. Моделирование асинхронного двигателя с устройством косвенного измерения момента / А.Д. Умурзакова, Л.С. Удут // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – с. 931–935.
27. Дементьев, Ю. Н. Модель асинхронного электродвигателя для измерения механических координат / А.Д. Умурзакова, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. – 2013. – № 3. – с. 200–205.
28. Дементьев, Ю.Н. Оценка расчета механических координат асинхронного электропривода / А.Д. Умурзакова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614817. – В реестре программ для ЭВМ 22.05.2013.
29. Дементьев, Ю.Н. Расчет электромагнитного момента асинхронного электропривода / А.Д. Умурзакова, Л.С. Удут // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618084. – В реестре программ для ЭВМ 08.08.2014.
30. Дементьев, Ю.Н. Расчет электромагнитного момента асинхронного электропривода с учетом широтно-импульсной модуляции / А.Д. Умурзакова, Л.С. Удут // Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2014618091. – В реестре программ для ЭВМ 08.08.2014.

- 31.Дементьев, Ю.Н. Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова, В.Ю. Мельников // Патент на изобретение РФ № 2525604, бюл. № 23. – 20.08.2014.
- 32.Дементьев, Ю.Н. Устройство для измерения крутящего момента трехфазного асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Патент на полезную модель РФ № 131874, бюл. 24. – 27.08.2013.
- 33.Дементьев, Ю.Н. Устройство для измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Патент на полезную модель РФ № 133314, бюл. 28. – 10.10.2013.
- 34.Дементьев, Ю.Н. The means of measuring the output coordinates for the three-phase asynchronous electric motor / А.Д. Умурзакова // Материалы Международной IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи «Sibcon», Омск, 2015. – с. 236 – 238.
- 35.Дементьев, Ю.Н. Электрический привод / А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев // Издательство ТПУ: Томск, 2008. – 224 с.
- 36.Диткин, В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / А.П. Прудников. – М.: Наука, 1974. – 542 с.
- 37.Дьяконов, В. П. Matlab 6: Учебный курс / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
- 38.Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / В.П. Дьяконов.- М.: Солон-Пресс, 2005. – 576 с.
- 39.Изосимов, Д. Б. Многосвязный нелинейный идентификатор состояния асинхронного двигателя на скользящих режимах / Д. Б. Изосимов. – М.: Наука, 1983. – с.133–139
- 40.Ильинский, Н.Ф. Энергосбережение в электроприводе / Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.

41. Карасев, Б.В. Насосные и воздухоудувные станции / Б.В. Карасев. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 326 с.
42. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Академия, 2006. – 496 с.
43. Кацман, М.М. Электрический привод / М.М. Кацман. – Академия, 2005. – 384 с.
44. Каширских, В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей / В.Г. Каширских. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2005. – 139 с.
45. Кисаримов, Р.А. Электропривод / Р.А. Кисаримов. – М.: ИП РадиоСофт, 2008. – 352 с.
46. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
47. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / И. Рац. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
48. Кондрашев, В.Е. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов/ Королев С.Б. – Москва: Мир, 2002. – 350 с.
49. Копылов, И.П. Математическое моделирование асинхронных машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001.- 328 с.
50. Красс, М.С. Основы математики и ее приложения/ Б.П. Чупрынов. – М.: Дело, 2003. – 688 с.
51. Левинтов, С.Д. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента / А.М. Борисов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.
52. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
53. Лейтман, М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей / М.Б. Лейтман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 152 с.
54. Лобачев, П.В. Насосы и насосные станции / П. В. Лобачев. – М.: Стройиздат, 1983. – 191 с.

- 55.Макаров, В.Г. Оценивание параметров трехфазного асинхронного двигателя / В.Г. Макаров Ю.А. Яковлев // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – №9. – С. 418–425.
- 56.Макаров, В.Г. Идентификация параметров трёхфазного асинхронного двигателя / Макаров В.Г. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №3–4. – С. 88–101.
- 57.Макаров, В.Г. Анализ состояния и перспективы развития работ по идентификации параметров электрических машин / Макаров В.Г. // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14, №1. – С. 134–144.
- 58.Масандилов, Л.Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / В.В.Москаленко. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
- 59.Мельников В.Ю. Способ измерения угловой скорости вращения асинхронного трехфазного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // В сб. Труды региональной научно-технической конференции молодых ученых, студентов, аспирантов (с международным участием) «Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве», Омск, 2010. – с. 118-122.
- 60.Мельников, В. Ю. Датчик контроля координат трехфазного электродвигателя/ Е.Г. Бородацкий // Датчики электрических и неэлектрических величин: тез. докл. к первой международной конференции, Барнаул, 1993. – с.121–122.
- 61.Мельников, В. Ю. Косвенный контроль координат асинхронного короткозамкнутого двигателя / Е.Г. Бородацкий. – Алматы, 1994. – 69 с. Деп. в Казгос ИНТИ.
- 62.Мельников, В. Ю. Способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Предварительный Патент РК № 18934. – бюл. № 2. – 15.11.2007
- 63.Мельников, В. Ю. Способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Инновационный Патент РК № 20031. – бюл. № 2. – 2009.

64. Мельников, В.Ю. Датчик скорости и момента асинхронного двигателя без механического соединения с валом / Е.Г. Бородацкий, В.П. Ахмадиев, Н.Л. Назаренко // В сб. тезисы докладов к научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления», Гурфуз, 1995. – с. 16–18.
65. Мельников, В.Ю. Дискретный косвенный контроль механических координат асинхронного электропривода / Е.Г. Бородацкий // В сб. докладов Второй Международной конференции Датчики электрических и неэлектрических величин, Барнаул, 1995. – с. 82–83.
66. Мельников, В.Ю. Косвенный метод контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Материалы II Международной научно-практической конференции ««Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве», Павлодар, 2011. – с. 65–67.
67. Мельников, В.Ю. Косвенный метод контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Материалы II Международной научно-практической конференции ««Наука и образование в XXI веке: динамика развития в Евразийском пространстве», Павлодар, 2011. – с. 65–67.
68. Мельников, В.Ю. Моделирование системы непрямого контроля координат асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Материалы Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы и перспективы применения чистых технологий для устойчивого развития регионов», Павлодар, 2005. – с. 47–49.
69. Мельников, В.Ю. Моделирование системы непрямого контроля координат при прямом пуске асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт», Омск, 2007. – с. 102–105.

70. Мельников, В.Ю. Применение математической модели для контроля механических координат асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Е.Г. Бородацкий // В сб. Энергосберегающая технология использования энергетических ресурсов, Алматы: Гылым, 1995. – с. 52–57.
71. Мельников, В.Ю. Разработка устройства контроля координат электропривода с трехфазным асинхронным двигателем / Е. Г. Бородацкий // В сб. Наука и новая технология в электроэнергетике Павлодар – Экибастузского района, Павлодар, 1994. – с. 34–35.
72. Мельников, В.Ю. Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Предварительный Патент РК № 18973 – бюл. № 8. – 15.08.2008.
73. Мельников, В.Ю. Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Инновационный Патент РК № 21033. – бюл. № 3. – 2009.
74. Мельников, В.Ю. Способы измерения угловой скорости вращения и крутящего момента асинхронного электродвигателя / Умурзакова А.Д. // Материалы докладов шестнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность», Томск, 2010. – с. 404–406.
75. Мельников, В.Ю. Устройство для измерения частоты вращения асинхронного электродвигателя / Е.Г. Бородацкий, В.П. // Патент РК, МПК Н 02 К 19/24, № 6585. – 10.07.1996.
76. Мельников, В.Ю. Устройство для измерения частоты вращения асинхронного вращения / Е.Г. Бородацкий // Патент РК № 8343, кл. G01L 3/10, бюл. № 12. – 1999.
77. Нестеровский, А.В. Оперативная идентификация асинхронных электродвигателе в составе электропривода промышленных установок: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Александр Владимирович Нестеровский. – Кемерово, 2005. – 134 с.

78. Никитенко, А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов / Никитенко А.Г. – М.: Высшая школа, 1983. – 192 с.
79. Пантелеев, А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.С. Бортакровский. – М.: Высшая школа, 2003. – 583 с.
80. Пересада, С. М., Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем / С.Н. Ковбаса // Техн. электродинам. – 2002. – № 4. – с. 17-22.
81. Поздеев, Д.А. Математическое исследование структуры бездатчикового частотно-токового асинхронного электропривода с векторным управлением / С.А. Хрещатая // Электротехника. – 2002. – № 9. – с.37–43.
82. Половко, А.М. MATLAB для студента / Бутусов П.Н. – Санкт-Петербург: БХВ – Петербург, 2005. – 320 с.
83. Потапов, Л.А. Измерение вращающихся моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей / Ф.М. Юферов. – М.: Энергия, 1984. – 128 с.
84. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
85. Рыбальченко, Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящего момента / Ю.И. Рыбальченко. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
86. Свечарник, Д. В. Электрические машины непосредственного привода. Безредукторный электропривод / Д. В. Свечарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
87. Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов, Е.Д. Лебедев, Л.М. Тарасенко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
88. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
89. Сошкин, В.П. Устройство для контроля крутящего момента на валу электродвигателя / П.К. Гукмиков, И.А. Прошин // Ав. Св. СССР, кл. G 01 L 3/10, № 2823663. – 05.06.1981.

90. Старокожев, А.И. Модель системы бездатчикового векторного управления / Фролов Ю.М. // Труды Региональной научно-технической конференции «Системы и элементы роботизированных комплексов», Воронеж, 2003. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2003. – с. 107–113.
91. Старокожев, А.И. Моделирование и исследование регулируемого методом прямого управления бездатчикового электропривода на базе асинхронного электродвигателя: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Александр Иванович Старокожев. – Воронеж, 2006. – 138 с.
92. Терзян, А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин / А.А. Терзян. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
93. Трусов, П.В. Введение в математическое моделирование / П.В. Трусов. – М.: Логос, 2004. – 440 с.
94. Тун, А.Я. Системы контроля скорости электропривода / А.Я. Тун. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
95. Туричин, А.М. Электрические измерения неэлектрических величин / Туричин А.М. – Ленинградское отделение: Энергия, 1975. – 576 с.
96. Умурзакова А.Д. Косвенные способы измерения выходных координат асинхронного электродвигателя / Мендыбаев С.А. // Материалы XI международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике», Екатеринбург, 2012. – с. 91-93.
97. Умурзакова, А.Д. The means of measuring the imprint coordinates for the three-phase asynchronous electric motor / А.Д. Умурзакова // Материалы Международной конференции «LifeIT2009: IT meets environmental and sustainable energy technologies», Hagen, Германия, 2009. – с.10.
98. Умурзакова, А.Д. Разработка алгоритма и способа косвенного контроля электромагнитного момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А.Д. Умурзакова // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XVII Всероссийской научно-технической

- конференции/ Томский политехнический университет. – Томск: СПБ ГРАФИКС, 2011. – с 82 – 84.
99. Умурзакова, А.Д. Способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя на основе косвенного метода контроля координат / А.Д. Умурзакова // Материалы Международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы», Павлодар, 2009. – с.56-59.
 100. Умурзакова, А.Д. Устройство для измерения крутящего момента трехфазного асинхронного электродвигателя / А.Д. Умурзакова // Материалы II международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, 2014. – с.45-47.
 101. Чернышев, А.Ю. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / И.А. Чернышев // Материалы международной научно-технической конференции, Томск, 2007. – с. 269–272.
 102. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
 103. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
 104. Шрамков, Е.Г. Электрические измерения / Е.Г. Шрамков. – М.: Высшая школа, 1972. – 520 с.
 105. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.
 106. Dementyev, Yuriy N., The engine mechanical coordinates measuring in the asynchronous motor / Anara D. Umurzakova // MATEC Web of Conferences 19, 010027 (2014) DOI: 10.1051 / matecconf / 20141901027. – 2014.
 107. Holtz, J. Speed estimation and sensorless control of ac drivers / J. Holtz // International conference of Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. – 1993. - P.: 649–654.

108. Holtz, J. Sensorless speed and position control of induction motor drives / J. Holtz // A tutorial, 29th Annual Conference of IECON. – 2003.
109. Kubota, Hisao. Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Machines using Flux Observer / Kouki Matsuse // In Proc. IECON '94. - 1994. – V.3. – P.1611–1615.
110. Miyeshita, Ichiro. Recent Industrial Application of Speed Sensorless Vector Control in Japan / Akio Imanayida, Takashi Koga // In Proc. IECON *94. – 1994. – V.3. – P.1573–1578.
111. 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.
112. Matsuse, K. Sensorless control of AC Motor drives / K. Matsuse. – IEEE press book. – 1996.
113. Racz, I. Messgerät zur Messung des Drehmomentes von Wechselstrommaschinen / F. Csorgits, S. Halasz, M. Hunuar, Z. Schmidt. – Elektrie, 1975 – S. 47–50.
114. Tung-Hai Chin. Approaches for Vector Control of Induction Motor without Speed Sensor / Tung-Hai Chin // In Proc. IECON *94. – 1994. – V.3. – P. 1616–1620.
115. Schroder D. Neural-Net Based Observers for Sensorless Drives / C. Schaffner and U. Lenz. // In Proc. IECON *94. – 1994. – V.3. – P. 1599–1610.
116. Schröder, P. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / P. Schröder. – Berlin: Springer, 2001. – 1172 p
117. Vas, Peter. Sensorless vector and direct torque control / Peter Vas. – Oxford University press. – 1998.

Приложение



Утверждаю

Директор ЭНИН, д.т.н.

В.М. Завьялов

«24» апрель 2015 г.

Акт внедрения

в учебный процесс ТПУ результатов диссертационной работы
Умурзаковой А.Д.

Настоящий акт составлен о том, что в учебный процесс кафедры «Электропривод и электрооборудование» Томского политехнического университета разработаны и внедрены алгоритмы и модели асинхронного двигателя в электроприводе с косвенным контролем выходных механических переменных с векторным и скалярным управлением, разработанные в ТПУ под руководством к.т.н. Дементьева Ю.Н. и при непосредственном участии аспиранта Умурзаковой А.Д.

Представленные алгоритмы и модели позволяют провести расчет механических координат асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в электроприводе и позволяют провести оценку электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в электроприводе; построение временных графиков электромагнитного момента и угловой скорости вращения асинхронного двигателя в электроприводе.

Указанные алгоритмы и модели используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и электрооборудование» ТПУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и инженеров по специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок технологических комплексов».

Зам. зав. кафедрой ЭПЭО ТПУ
по НИР

 С.Н. Кладиев

«24» апрель 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор по инновационному
развитию ООО «ЭлеТим»,

Костарев Максим Михайлович

«22» февраля 2015 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Умурзаковой Анары Даукеновны

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Умурзаковой А. Д. применялись при разработке программного обеспечения для микро-процессорной системы управления преобразователем частоты ESD-TCL. Данные блоки используются для организации скалярного и векторного управления асинхронными электроприводами общепромышленных механизмов.

В основу разработанного программного обеспечения положены следующие результаты диссертационной работы:

1. Имитационная модель процессов в асинхронном двигателе, учитывающая влияние тепловых режимов и позволяющая отслеживать изменения параметров асинхронного двигателя при его работе в составе общепромышленных механизмов различного типа и назначения.
2. Алгоритм для расчёта электромагнитного момента и угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя, позволяющий повысить стабильность и точность работы асинхронного электропривода при бездатчиковом способе управления.
3. Мониторинг режимов работы асинхронного двигателя позволяет реализовать непрерывный контроль за состоянием обмоток и изменением выходных механических переменных с целью раннего прогнозирования аварийных отключений электропривода по причине возникновения неисправностей со стороны асинхронного двигателя.

Внедрение результатов диссертационной работы позволяет улучшить эксплуатационные характеристики асинхронных электроприводов на основе преобразователей частоты ESD-TCL и упрощает проведение пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию.

Руководитель группы разработки ПО
для силовой электроники, к.т.н.
Ланграф Сергей Владимирович





жауапкершілігі шектеулі серіктестігі
товарищество с ограниченной
ответственностью
"КФ КОТЭС"

140011,
Казахстан Республикасы,
Павлодар қаласы, Кутузов көшесі, 95/1
тел. +7 (7182) 68 77 19, факс +7 (7182) 68 77 20, email: info@kz.segrp.ru, www.segrp.ru

140011,
Республика Казахстан,
г. Павлодар, ул. Кутузова, 95/1

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы Умурзаковой Анары Даукеновны.

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер Погудин А.И., ведущий инженер отдела КИПиА Домаев А.Н., составили настоящий акт о том, что используются следующие результаты, полученные в ходе выполнения кандидатской диссертации Умурзаковой Анары Даукеновны, а именно:

- аналитические зависимости, описывающие математические модели вычислительно - измерительного комплекса косвенного контроля выходных координат асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в электроприводе;
- имитационные модели вычислительно - измерительного комплекса косвенного контроля выходных координат асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в электроприводе для исследования механических характеристик электропривода;
- алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в электроприводе.

Данные технические решения были приняты к использованию электропривода типа АИР71В2У3 в регуляторе температуры редуцированного пара БРОУ при реконструкции энергоблока №6 на электростанции АО «ЕЭК».

Принятые научные решения позволили упростить конструкцию электропривода, уменьшить его стоимость и массогабаритные показатели, повысить точность позиционирования в динамических режимах работы электропривода, повысить межремонтный интервал асинхронных электродвигателей и эффективность технологических механизмов.

Главный инженер

Ведущий инженер ОКИПиА



Погудин А.И.

Домаев А.Н.

Қазақстан Республикасының
Білім және ғылым министрлігі

ИННОВАЦИОННО-ЕУРАЗИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Министерство образования и науки
Республики Казахстан

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

АКТ

АКТ

16 марта 2015 г. № 242

Павлодар к.

г. Павлодар

[О внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс]

УТВЕРЖДАЮ



Проректор-проректор
по организационному развитию

Е.Б. Никитин

16 марта 2015 г.

Мы, нижеподписавшиеся, председатель комиссии - Комардина Л.С., проректор по учебно-методической работе и качеству образования,

члены комиссии: 1. Абраменко А.П., начальник отдела научно-организационной работы;

2. Кинжибекова А.К., директор департамента энергетики и металлургии,

составили настоящий акт о том, что в департаменте энергетики и металлургии с 01 сентября 2014 г. используются в учебном процессе результаты, полученные в ходе выполнения кандидатской диссертации с 01 сентября 2012 г. по 30 июня 2014 г. по теме «Косвенный контроль выходных механических переменных асинхронного электродвигателя в электроприводе» в соответствии с собственной инициативой под научным руководством Дементьева Ю.Н., к.т.н., заведующего кафедрой «Электропривод и электрооборудование» Национального исследовательского Томского политехнического университета исполнителем Умурзаковой Анарой Даукеновной, старшим преподавателем департамента энергетики и металлургии Инновационного Евразийского университета.

Использование результатов диссертационной работы заключается в следующем: результаты используются при составлении заданий на выполнение практических и лабораторных занятий, по дисциплине «Электрические машины» по специальности 5В071800 «Электроэнергетика», а также в специальном разделе дипломного проектирования бакалавров по специальности 5В071800 «Электроэнергетика».

Результатом внедрения результатов диссертационной работы явилось: повышение уровня освоения изучаемого материала, качества преподавания дисциплины «Электрические машины» для студентов по специальности 5В071800 «Электроэнергетика».

Настоящий акт составлен в 4 экз., и передан на хранение:

первый экз. - в департамент энергетики и металлургии, второй экз. - в отдел образовательных программ, третий экз. - в отдел научно-организационной работы, четвертый экз. - соискателю ученой степени.

Председатель комиссии

Л.С. Комардина

Члены комиссии:

А.П. Абраменко

А.К. Кинжибекова