

На правах рукописи



Умурзакова Анара Даукеновна

КОСВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре электропривода и электрооборудования Энергетического института.

Научный руководитель: Дементьев Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент

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

Орлов Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Общая электротехника и автоматика» ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

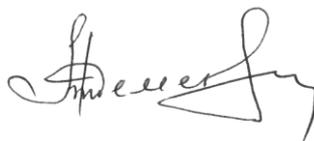
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита диссертации состоится 30 сентября 2015 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан « 13 » июля 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета Д 212.269.11



к.т.н., доцент
Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Знание текущих значений параметров и состояния асинхронных двигателей позволяет осуществлять контроль технологического процесса СПЖ и режима работы АД, в процессе работы контролировать и проводить диагностирование технического состояния АД с выявлением на ранних этапах появляющихся дефектов, чтобы вовремя их устранить.

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., Панкратов В.В., 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 контроль механических выходных переменных ЭП можно проводить 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 момента и скорости в ЭП. При этом контролируе-

мая величина определяется косвенно через легкодоступные измерению электрические переменные.

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 в ЭП до сих пор окончательно не решен и является актуальным.

Объектом исследования является асинхронный ЭП с устройством косвенного контроля (УКК) выходных механических переменных АД.

Предметом исследования является АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости.

Целью работы является оценка возможности применения косвенного контроля для определения выходных механических переменных АД в ЭП и исследование ЭП с УКК электромагнитного момента и угловой скорости АД.

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 АД;
- разработка математического описания АД с УКК выходных механических переменных, пригодного для обоснования на его основе способов контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД в ЭП;
- получение аналитических зависимостей, позволяющих проводить непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости, а также упростить математическое описание АД с УКК и их схемную реализацию;
- разработка алгоритмов и способов косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК в ЭП;
- разработка имитационных моделей частотно-управляемого ЭП с УКК электромагнитного момента и угловой скорости АД для исследования его динамических характеристик;
- экспериментальное исследование на макетном образце частотно-управляемого ЭП с УКК 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 АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости в ЭП;

- аналитические зависимости АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости, позволяющие проводить непрерывный контроль этих переменных в ЭП;

- алгоритмы и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД, в том числе и технические решения, защищенные 3 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.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.03:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка ... алгоритмов эффективного управления.

3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель АД с УКК выходных механических переменных, обеспечивающая контроль электромагнитного момента и угловой скорости в электроприводе и отличающаяся от известных, введением в математическое описание дополнительных переменных, учитывающих изменение температуры проводников обмотки статора, частоты основной гармоники напряжения статора и температурный коэффициент, зависящий от материала проводника;

- предложены аналитические зависимости АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости, позволяющие упростить их расчет и проводить непрерывный контроль этих переменных;

- разработаны алгоритм и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя, отличающиеся от

известных возможностью непрерывного контроля значений момента и угловой скорости в различных режимах работы ЭП и простотой схемной реализации.

Научная новизна работы подтверждена патентом на изобретение РФ «Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя» (№ 2525604) и частично патентами на полезную модель РФ «Устройство для измерения крутящего момента трехфазного асинхронного электродвигателя» (№ 131874), «Устройство для измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя» (№ 133314) и свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет электромагнитного момента асинхронного электропривода» (№ 2014618084), «Расчет электромагнитного момента асинхронного электропривода с учетом широтно-импульсной модуляции» (№ 2014618091), «Оценка расчета механических координат асинхронного электропривода» (№ 2013614817).

Практическая ценность работы состоит в разработке способов 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 УКК электромагнитного момента и угловой скорости позволяют проводить исследование асинхронных ЭП 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; 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.

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 приложений на 4 страницах.

Работа выполнена в рамках гранта программы «Болашак», ВИУ ЭНИН_138_2014 и Госзадания «Наука»-2015.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены суть проблемы, актуальность темы, сформулированы цель, задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости и практической ценности, реализации и апробации работы.

В первой главе проведен обзор современного состояния и анализ научно-технических разработок, способов контроля выходных механических переменных асинхронного двигателя. Выполнен анализ существующих методов и устройств контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД и показана целесообразность применения косвенного контроля переменных АД в различных технологических процессах, например, транспортировки жидких сред, для мониторинга загруженности двигателей и регулирования скорости в заданных пределах непосредственно в процессе работы для знания состояния электродвигателя в различных режимах работы технологического процесса.

Во второй главе приведено математическое описание, алгоритм и способы косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД.

Для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД используется математическая модель, в которой их значения определяются по данным двигателя и легко измеряемым величинам с помощью известных на практике устройств.

Исходные уравнения для математической модели АД представлены следующим образом.

$$\begin{aligned}
 U_{\alpha s} &= u_a; \quad U_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{3}} u_a + \frac{2}{\sqrt{3}} u_b; \\
 I_{\alpha s} &= i_a; \quad I_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b; \\
 I'_{\alpha r} &= \frac{1}{L_\mu} \int U_{\alpha s} dt - \frac{R_s}{L_\mu} \int I_{\alpha s} dt - \frac{L_s}{L_\mu} \cdot I_{\alpha s}; \\
 I'_{\beta r} &= \frac{1}{L_\mu} \int U_{\beta s} dt - \frac{R_s}{L_\mu} \int I_{\beta s} dt - \frac{L_s}{L_\mu} \cdot I_{\beta s}; \\
 \omega &= \frac{\frac{L'_r}{L_\mu} \cdot U_{\alpha s} - \left(\frac{L'_r \cdot L_s}{L_\mu} - L_\mu \right) \cdot \frac{dI_{\alpha s}}{dt} - \frac{L'_r \cdot R_s}{L_\mu} \cdot I_{\alpha s} + R'_r \cdot I'_{\alpha r}}{L_\mu \cdot I_{\beta s} - L'_r \cdot I'_{\beta r}}; \\
 M_\Delta &= \frac{3}{2} L_\mu \cdot p_n \cdot (I_{\alpha s} \cdot I'_{\beta r} - I_{\beta s} \cdot I'_{\alpha r})
 \end{aligned} \tag{1}$$

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.

Математические выражения для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК, полученные из системы уравнений (1) представлено следующей системой уравнений

$$\begin{cases}
 M(t) = \sqrt{3} \cdot p_n \cdot \left[i_a(t) \cdot \int [u_b(t) - R_s \cdot i_b(t)] dt - i_b(t) \cdot \int [u_a(t) - R_s \cdot i_a(t)] dt \right] \\
 \omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) \cdot \left[1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t) \right]
 \end{cases} \tag{2}$$

где $\omega_{\text{и}}(t) = \frac{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}{\int (R_s \cdot [i_a(t) + 2 \cdot i_b(t)] - [u_a(t) + 2 \cdot u_b(t)]) dt - L_\beta \cdot [i_a(t) + i_b(t)]}$ - измеренное мгновенное значение угловой скорости;

$\Delta\omega_{\text{инт}}(t) = \frac{\int [u_a(t) - R_s \cdot i_a(t)] dt}{T'_r \cdot [u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)]}$ - динамическая интегральная составляющая относительного значения угловой скорости;

$\Delta\omega_{\text{диф}}(t) = \frac{L_\beta (di_a(t)/dt)}{u_a(t) - (R_s + R'_r \alpha) \cdot i_a(t)}$ - динамическая дифференциальная составляющая относительного значения угловой скорости;

$R'_r \alpha = R'_r \cdot \alpha$ - активное приведенное сопротивление обмотки ротора с учетом коэффициента α ; R'_r - активное приведенное сопротивление ротора; $\alpha = L_s / L'_r$ - коэффициент, равный отноше-

нию полной индуктивности обмотки статора L_s к приведенной полной индуктивности обмотки ротора L_r' ; $L_\beta = L_\mu \cdot \beta - L_s$ – индуктивность с учетом коэффициента β ; L_μ – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $\beta = L_\mu / L_r'$ – коэффициент, равный отношению взаимной индуктивности L_μ к приведенной полной индуктивности обмотки ротора L_r' ; $T_r' = L_r' / R_r'$ – постоянная времени ротора.

Далее в главе приведено математическое описание АД с УКК (3), отличающееся от (2), тем, что 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, которые позволяют улучшить качество контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД. Тогда систему уравнений для АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости можно записать в следующем виде

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

где $\omega_{\text{и}}(t) = \frac{\int_0^{1/f} [z \cdot [i_a(t) + 2 \cdot i_b(t)] - [u_a(t) + 2 \cdot u_b(t)] dt - L_\beta \cdot [i_a(t) + i_b(t)]}{\sqrt{3} \cdot [u_a(t) - (z + R_r' \alpha) \cdot i_a(t)]}$ – измеренное мгновенное

значение угловой скорости; $\Delta\omega_{\text{инт}}(t) = \frac{\int_0^{1/f} [u_a(t) - z \cdot i_a(t)] dt}{T_r' \cdot [u_a(t) - (z + R_r' \alpha) \cdot i_a(t)]}$ – динамическая

интегральная составляющая относительного значения угловой скорости;

$\Delta\omega_{\text{диф}}(t) = \frac{L_\beta \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (z + R_r' \alpha) \cdot i_a(t)}$ – динамическая дифференциальная составляющая относительного значения угловой скорости; f – частота основной гармоники напряжения питания АД; z – активное сопротивление обмотки статора с учетом температурного коэффициента α_t , которое определяется следующим образом $z = R_s \cdot [1 + \alpha_t \cdot (t_{\text{пр}} - 20)]$, где α_t – температурный коэффициент, характеризующий свойства проводников обмотки статора АД; $t_{\text{пр}}$ – температура проводников обмотки статора АД.

Наличие интегральных составляющих, имеющих в системах уравнений (2) и (3), приводит к появлению погрешностей при определении величин токов и напряжений и может привести к накоплению ошибки контролируемых выходных величин электромагнитного момента и угловой скорости. Поэтому для снижения погрешности при определении величин электромагнитного момента и угловой скорости в математическом описании АД с УКК выходных механических переменных необходимо исключить интегральные составляющие в сис-

теме уравнений, имеющих в системах уравнений (2) и (3), приводит к появлению погрешностей при определении величин токов и напряжений и может привести к накоплению ошибки контролируемых выходных величин электромагнитного момента и угловой скорости. Поэтому для снижения погрешности при определении величин электромагнитного момента и угловой скорости в математическом описании АД с УКК выходных механических переменных необходимо исключить интегральные составляющие в сис-

теме уравнений, используя преобразования Фурье, Эйлера, Парсеваля. Тогда систему уравнений для определения электромагнитного момента и угловой скорости можно представить в следующем виде

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

где

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

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

В соответствии с математическими выражениями (2, 3) построены обобщенные функциональные схемы косвенного контроля выходных механических переменных АД, представленные на рис. 1 (а, б).

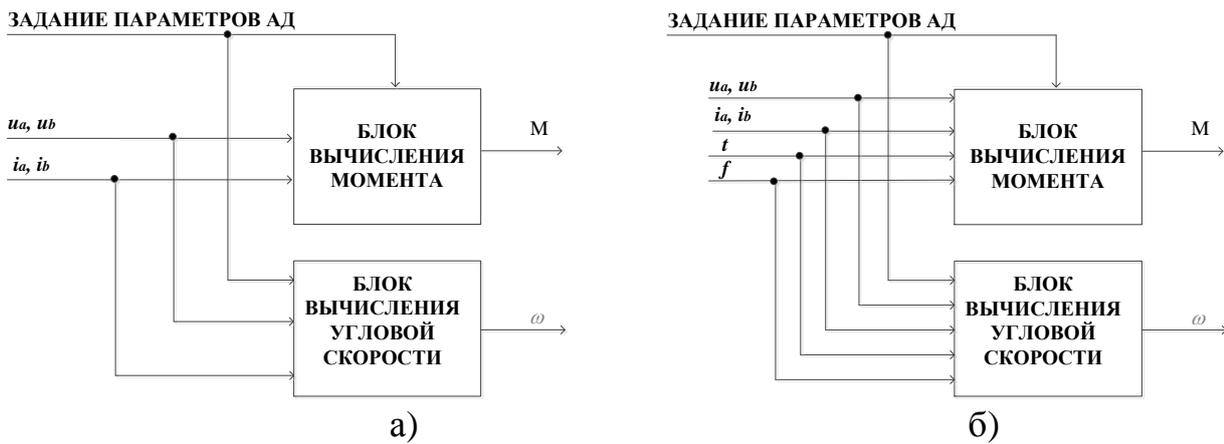


Рис.1 Обобщенная функциональная схема контроля выходных механических переменных АД

Алгоритм косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД приведен на рис. 2. В алгоритме (рис. 2), учитывая данные АД, постоянные коэффициенты и значения фазных напряжений и токов, полученных с соответствующих датчиков, определяются выходные механические переменные АД в блоках вычисления электромагнитного момента и угловой скорости, причем для улучшения качества контроля электромагнитного момента и угловой скорости учтены изменения сопротивления обмотки статора, температуры проводников обмотки статора, частоты основной гармоники напряжения питания и температурного коэффициента, характеризующего свойства проводников обмотки статора АД.

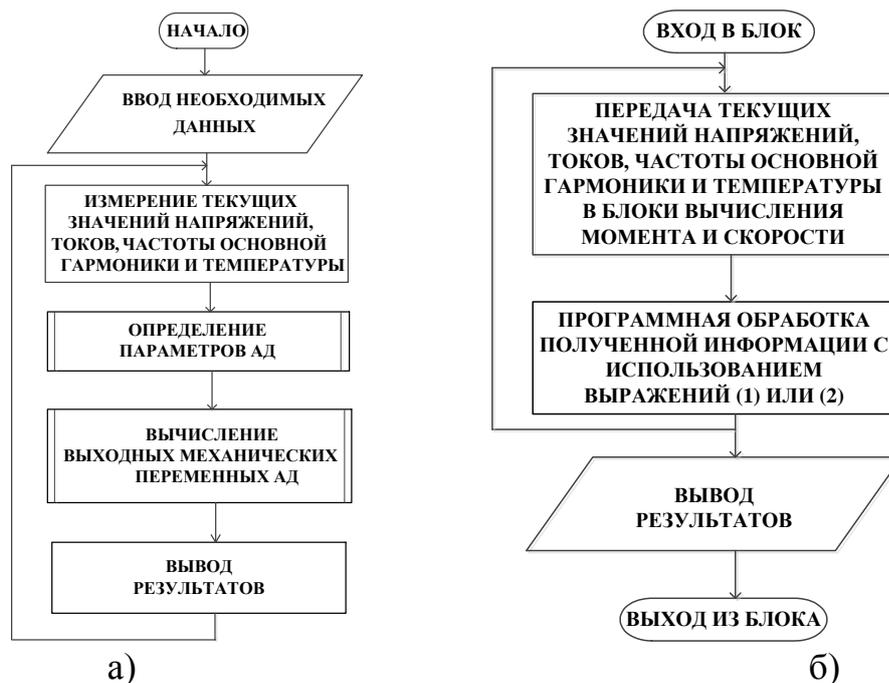


Рис. 2 Алгоритм косвенного контроля выходных механических переменных АД (а) и блок вычисления выходных механических переменных АД (б)

Общие схемы реализации косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД представлены на рис. 3 (а, б).

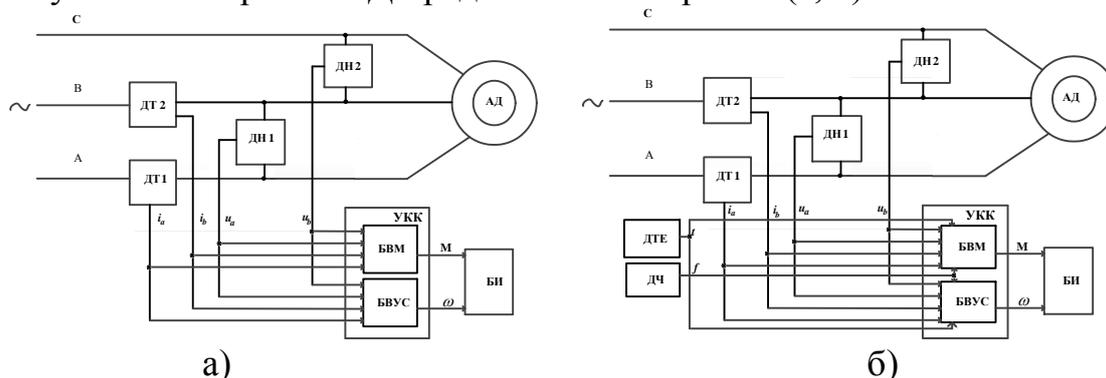


Рис. 3 Общая схема косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК

Схемы содержат асинхронный двигатель (АД), датчики тока (ДТ1, ДТ2) и напряжения (ДН1, ДН2), устройство косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости (УКК) и блок индикации (БИ). В схеме рис. 3, б кроме вышеперечисленных блоков добавлены датчики частоты (ДЧ) и температуры (ДТЕ). С помощью УКК определяются электромагнитный момент и угловая скорость АД, а их значения выводятся БИ. Блоки БВМ и БВУС предназначены для вычисления электромагнитного момента и угловой скорости АД в соответствии с уравнениями (2) и (3).

В третьей главе для исследования эффективности работы АД с УКК использован метод имитационного моделирования, а в качестве средства моделирования – компьютерная среда MatLab. Имитационное моделирование АД с УКК выходных механических переменных проведено в ЭП при частотном скалярном

управлении без ШИМ и с учетом ШИМ при частотном скалярном и векторном управлении.

На рис. 4 представлена имитационная модель АД с УКК в ЭП электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя. В состав имитационной модели входят суперблоки: модель АД, выполненная на основе классического математического описания асинхронного двигателя; формирователь фазных напряжений; вычислитель действующего тока статора; инерционная масса; устройство сравнения полученных выходных механических переменных с УКК и АД; УКК выходных механических переменных АД, которое включает в себя блоки вычисления электромагнитного момента и угловой скорости, реализованные на основе выражений (2) и (3).

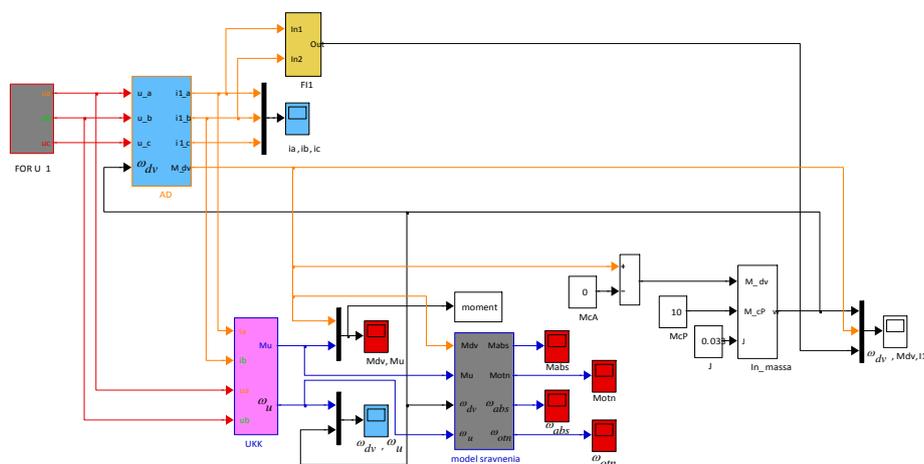


Рис. 4 Имитационная модель АД с УКК в ЭП электромагнитного момента и угловой скорости при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя

На рис. 5 и 6 представлены зависимости тока $I(t)$, скорости $\omega(t)$, момента $M(t)$, полученные с АД (АИР90L4) и с УКК при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя для режима прямого пуска АД при различных значениях нагрузки.

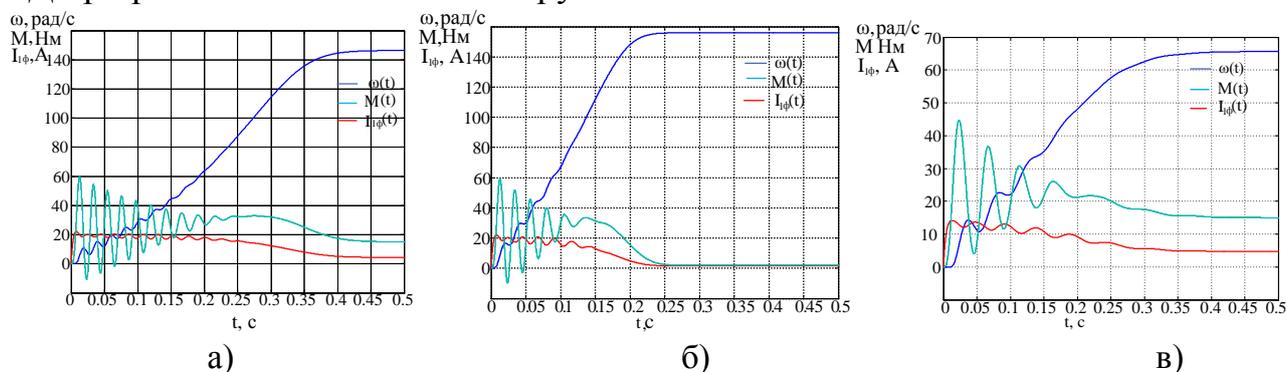


Рис. 5 Зависимости $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$, полученные с АД и с УКК в ЭП при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (прямой пуск а: при $f=50$ Гц, $M_c=10$ Нм; б: $f=50$ Гц, $M_c=2$ Нм; в: при $f=25$ Гц, $M_c=15$ Нм, $U/f=\text{const}$)

Из рис. 5 видно, что независимо от нагрузки косвенный контроль угловой скорости и электромагнитного момента АД с УКК дает достаточную сходимость с контролируруемыми выходными переменными АД.

На рис. 6: M_{dv} , ω_{dv} – характеристики момента и угловой скорости, полученные с АД; M_u , ω_u – характеристики момента и угловой скорости, полученные с УКК.

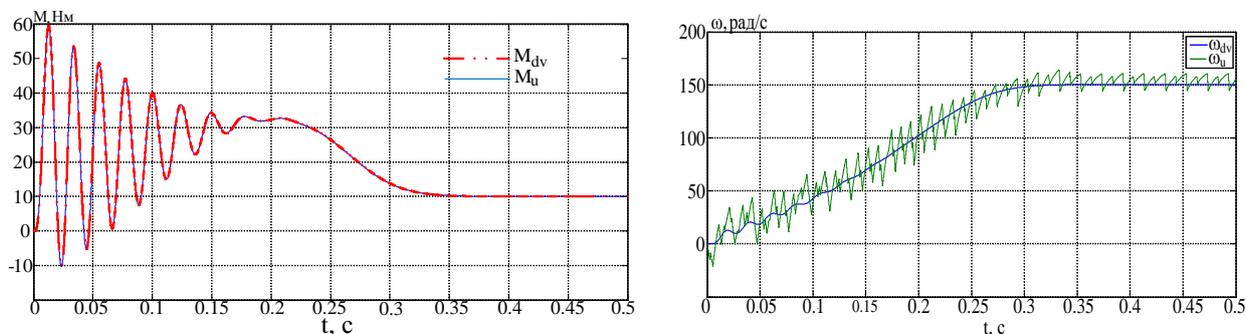


Рис. 6 Характеристики $M(t)$ и $\omega(t)$, полученные с АД и с УКК в ЭП при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (прямой пуск при $f=50$ Гц, $M_c=10$ Нм)

Для оценки полученных результатов определения электромагнитного момента и угловой скорости с АД и с УКК в имитационной модели введен блок сравнения, в котором вычисляются абсолютная и относительная погрешности сравниваемых выходных переменных. Анализ результатов полученных значений погрешностей электромагнитного момента и угловой скорости показывает, что относительная погрешность контроля электромагнитного момента составляет 1%, угловой скорости, из-за наличия корректирующего звена в блоке вычисления скорости, в пределах 10 %.

В главе также приведена имитационная модель АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости в ЭП при частотном скалярном управлении с учетом квантования по уровню и времени. Рассматриваемая модель аналогична модели АД с УКК в ЭП при частотном скалярном управлении без учета ШИМ напряжения питания двигателя (рис.4). Результаты исследований пуска АД (АИР90L4) приведены на рис.7.

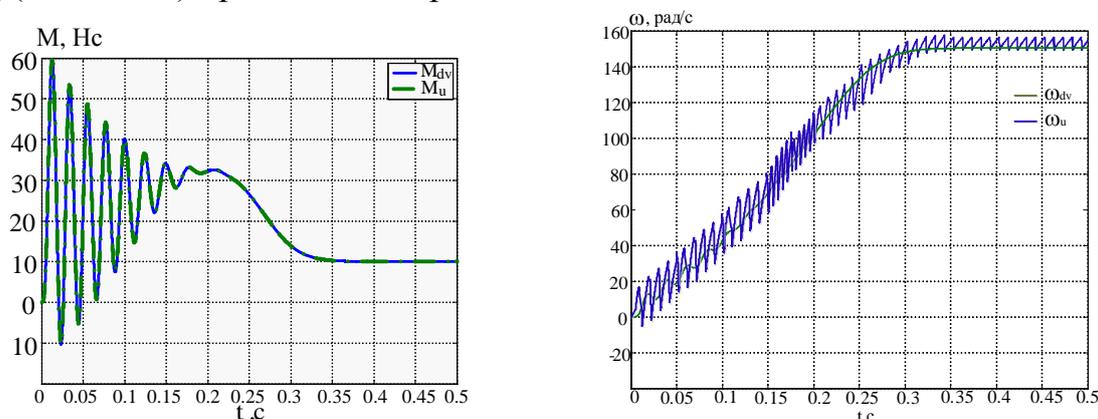


Рис. 7 Характеристики $M(t)$ и $\omega(t)$, полученные с АД и с УКК в ЭП при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания двигателя

Сравнение значений момента и угловой скорости с АД и УКК показывает, что относительная погрешность контроля электромагнитного момента в ЭП при частотном скалярном управлении с учетом квантования напряжения питания двигателя составляет 3%, а угловой скорости – 10%.

Кроме того, проведено исследование прямого пуска АД (АИР 90L4) с УКК при частотном скалярном управлении в ЭП с учетом ШИМ. Результаты исследований приведены на рис.8.

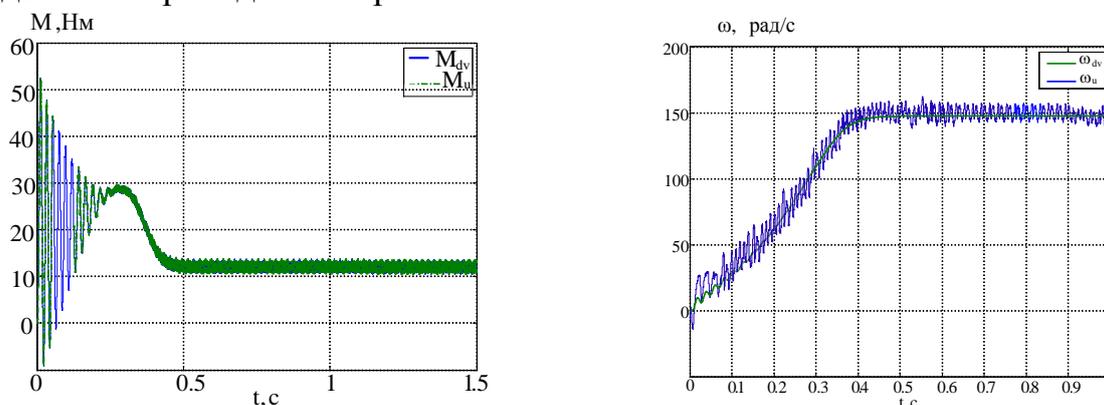


Рис. 8 Характеристики $M(t)$ и $\omega(t)$, полученные с АД и с УКК в ЭП при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ напряжения питания двигателя

Анализ полученных значений момента и угловой скорости с АД и УКК в ЭП при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ, показывает, что относительная погрешность электромагнитного момента составляет 1%, а угловой скорости – 8%.

На схеме имитационной модели, разработанной автором и представленной на рис. 9, проведено исследование ЭП при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ на базе АД (АВ250S6) с УКК электромагнитного момента.

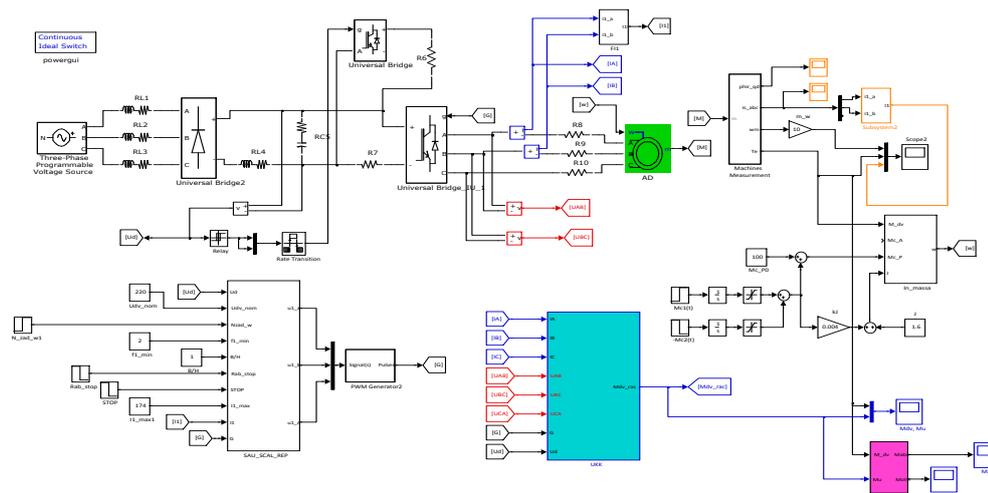


Рис. 9 Имитационная модель АД с УКК в ЭП электромагнитного момента при частотном скалярном управлении с учетом ШИМ

Графики электромагнитного момента, полученные с АД и УКК в ЭП приведены на рис. 10.

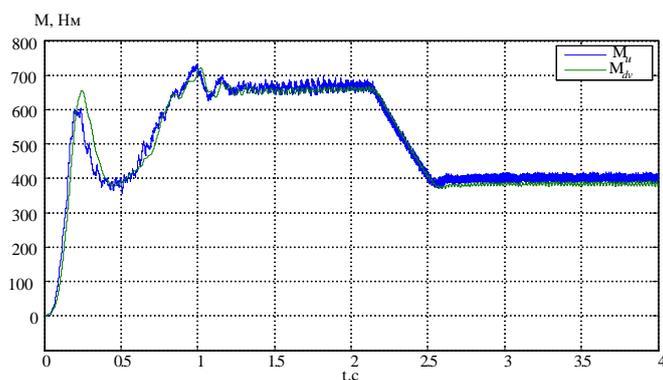


Рис. 10 Характеристики $M(t)$ с АД (АВ250S6) и с УКК в режиме пуска от датчика скорости в ЭП с частотным скалярным управлением с учетом ШИМ

Из характеристик момента следует, что расхождение между результатами контроля момента с АД и с УКК в ЭП является незначительными, что говорит об адекватности математического описания АД с УКК, представленного во второй главе, а ошибка контроля момента УКК составляет 10 %.

На рис. 11 приведена имитационная модель ЭП при частотном векторном управлении с учетом ШИМ для асинхронного двигателя (АВ250S6) с УКК электромагнитного момента.

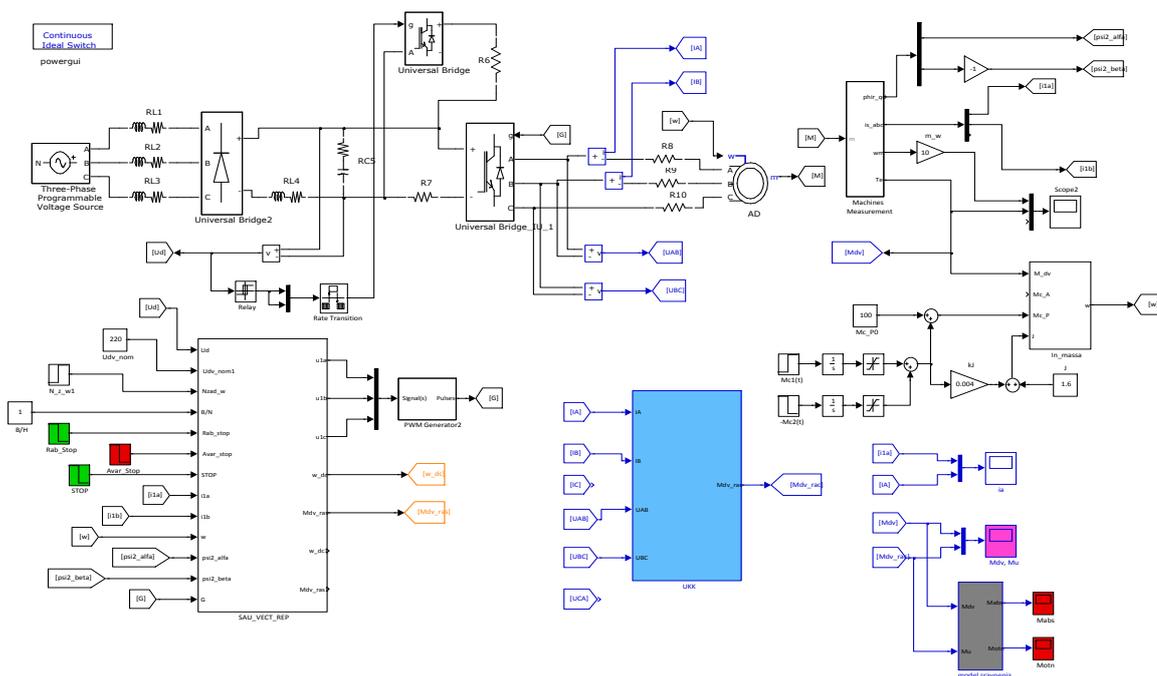


Рис.11 Имитационная модель АД с УКК в ЭП электромагнитного момента при частотном векторном управлении с учетом ШИМ

Результаты исследования ЭП представлены на рис. 12.

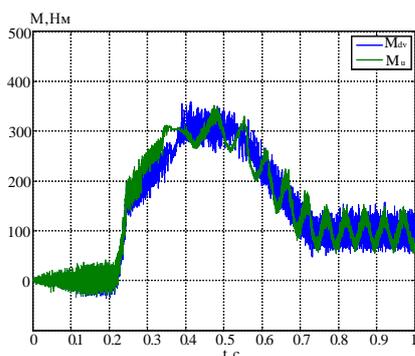


Рис. 12 Характеристики $M(t)$, полученные с АД (АВ250S6) и с УКК в ЭП при частотном векторном управлении с учетом ШИМ

Из рис. 12 видно, что величина относительной погрешности определения электромагнитного момента АД и с УКК в ЭП при частотном векторном управлении с учетом ШИМ не превышает 10 %.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования и практического применения УКК в АЭП. Для проверки разработанных в диссертации способов косвенного контроля выходных механических переменных АД были проведены эксперименты на специальном испытательном стенде, где использовался асинхронный двигатель АИР71В2У3 мощностью $P_n = 1,1$ кВт, с синхронной частотой вращения $n_n = 3000$ об/мин, номинальным напряжением $U_{нл} = 220$ В.

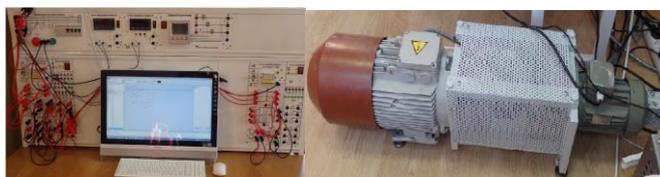


Рис. 13 Экспериментальный стенд и его компоненты

Обработка контролируемых величин электромагнитного момента и угловой скорости производилась на персональном компьютере с использованием программного продукта Mex Bios в программной среде MatLab. Для подтверждения достоверности определяемых величин электромагнитного момента и угловой скорости проведена серия экспериментов. Результаты исследований приведены на рисунке 14.

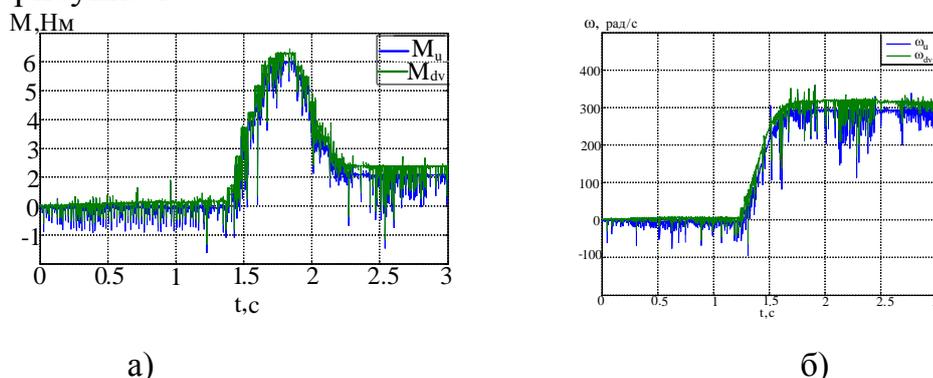


Рис. 14 Графики $\omega(t)$ и $M(t)$ (а - скорости с двигателя ω_{dv} и УКК ω_u , б - момента с двигателя M_{dv} и УКК M_u)

Анализируя полученные графики можно заключить, что значения электромагнитного момента и угловой скорости на лабораторном стенде реального АД с УКК имеют сходимость допустимую в инженерных расчетах, а значения погрешностей составляют 10 %.

В заключении изложены основные выводы по научным и практическим результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

В приложении приведены акты внедрения результатов научно-исследовательской работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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

1. Разработана математическая модель ЭП с УКК выходных механических переменных АД, обеспечивающая непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости.

2. Предложены аналитические зависимости математического описания АД с УКК выходных механических переменных, позволяющие упростить схемную реализацию УКК, и проводить расчет значений и непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости в ЭП.

3. В аналитических зависимостях математического описания АД с УКК в ЭП для улучшения качества контроля выходных механических переменных 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 АД, которые позволяют проводить непрерывный контроль выходных механических переменных АД и отличаются от известных простотой реализации схемных решений.

5. Исследованиями, проведенными на моделях частотно-управляемого ЭП со скалярным и векторным управлениями установлено, что применение в ЭП АД с УКК позволяет осуществлять непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости. Результаты моделирования, подтверждают адекватность теоретических положений математического описания ЭП с УКК электромагнитного момента и угловой скорости АД.

6. Установлено, что погрешность величин электромагнитного момента и угловой скорости в ЭП с частотно-скалярным управлением при косвенном контроле не зависит от типа применяемого АД, однако учет ШИМ напряжения питания двигателя влияет на конечный результат контроля электромагнитного момента и угловой скорости, полученных с выхода АД и УКК, причем расхождение между контролируемыми величинами электромагнитного момента и угловой скорости с выхода АД и УКК в случае учета ШИМ больше, чем без учета.

7. Полученные результаты экспериментальных исследований на лабораторном стенде подтверждают адекватность теоретических положений математического описания АД с УКК электромагнитного момента и угловой скорости в ЭП. Установлено, что значения электромагнитного момента и угловой скоро-

сти на лабораторном стенде реального АД и с УКК имеют сходимость допустимую в инженерных расчетах, а значения погрешностей составляют 10 %.

Основные результаты работы опубликованы

в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Дементьев Ю. Н., Умурзакова А.Д., Арсентьев О. В. Измерение механических координат двигателя в асинхронном электроприводе // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. - № 7. - С.127-132.

2. Дементьев Ю. Н., Умурзакова А. Д. Алгоритм контроля угловой скорости двигателя в асинхронном электроприводе // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока - 2013. - № 1. - С. 270 - 272.

3. Дементьев Ю. Н., Умурзакова А.Д., Хацевский К. Модель асинхронного электродвигателя для измерения механических координат // Омский научный вестник. - 2013. - № 3. - С. 200-205.

4. Дементьев Ю. Н., Умурзакова А.Д., Удут Л.С. Моделирование асинхронного двигателя с устройством косвенного измерения момента // Фундаментальные исследования. – 2014. - № 12. - С. 931-935.

5. Yuriy N. Dementyev, Anara D. Umurzakova The engine mechanical coordinates measuring in the asynchronous motor// MATEC Web of Conferences 19, 010027 (2014) DOI: 10.1051/matecconf/20141901027

6. Дементьев Ю. Н., Умурзакова А.Д., Хацевский К. В. Алгоритм и способ измерения угловой скорости вращения двигателя в асинхронном электроприводе // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. - № 1. - С. 393-396.

Материалы конференций и сборников статей:

7. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Моделирование системы непрямого контроля координат при прямом пуске асинхронного электродвигателя // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: Материалы Международной научно-практической конференции. - Омск, 2007.- С.102-105.

8. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Моделирование системы непрямого контроля координат асинхронного электродвигателя// Экологические проблемы и перспективы применения чистых технологий для устойчивого развития регионов: Материалы Международной научно-практической конференции. - Павлодар, 2005.- С.47-49.

9. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способ измерения крутящегося момента асинхронного электродвигателя// Энерго-, ресурсосберегающие технологии – основа индустриально - инновационного развития: Материалы Международной научно-практической конференции. - Павлодар, 2008.- С. 78-79.

10. **Умурзакова А.Д.** Способ измерения крутящегося момента асинхронного электродвигателя на основе косвенного метода контроля координат// Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции. - Павлодар, 2009. - С.56-58

11. **Умурзакова А.Д.** The means of measuring the imprint coordinates for the three-phase asynchronous electric motor// LifeIT2009: IT meets environmental and sustainable energy technologies: Материалы Международной научно–практической конференции. - Hagen, Германия, 2009. - С.10-11.

12. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способы измерения угловой скорости вращения и крутящего момента асинхронного электродвигателя// Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Материалы докладов шестнадцатой Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 2010. - С. 404-406.

13. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способ измерения угловой скорости вращения асинхронного трехфазного электродвигателя// Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве: Труды региональной научно-технической конференции молодых ученых, студентов, аспирантов (с международным участием), Омск, 2010. - С. 118-122.

14. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Косвенный метод контроля крутящего момента асинхронного электродвигателя// Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве: Материалы II Международной научно-практической конференции, Павлодар, 2011.- С.65-67.

15. **Умурзакова А.Д.** Разработка алгоритма и способа косвенного контроля электромагнитного момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором// Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во “СПБ ГРАФИКС”, 2011. – С. 82-84.

16. Умурзакова А.Д., Мендыбаев С.А. Косвенные способы измерения выходных координат асинхронного электродвигателя // Проблемы и достижения в промышленной энергетике: Материалы XI международной научно-практической конференции. - Екатеринбург, 2012. – С. 91-93.

17. Дементьев Ю. Н., Умурзакова А.Д. Алгоритм и способ измерения крутящего момента двигателя в асинхронном электроприводе // Современные техника и технологии: Материалы XIX Международной научно–практической конференции молодых ученых. – Томск, 2013. – С. 355–356.

18. **Умурзакова А.Д.** Устройство для измерения крутящего момента трехфазного асинхронного электродвигателя // Интеллектуальные энергосистемы: Материалы II международного форума. - Томск, 2014. - С.45-47

Патенты и авторские свидетельства:

19. Инновационный Патент РК № 21033 (KZ). Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя/ Мельников В.Ю., **Умурзакова А.Д.** Опубликовано 16.03.2009, Бюл. № 3.

20. Предварительный Патент РК № 18973 (KZ). Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя/ Мельников В.Ю., **Умурзакова А.Д.** Опубликовано 15.08.2008, Бюл. № 8.

21. Предварительный Патент РК № 18934 (KZ). Способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя/ Мельников В. Ю., **Умурзакова А.Д.** Опубликовано 15.11.2007. Бюл. № 11.

22. Инновационный Патент РК № 20031(KZ). Способ измерения крутящего момента асинхронного электродвигателя/ Мельников В. Ю., **Умурзакова А.Д.** Опубликовано 16.13.2009, бюл. № 2.

23. Патент на полезную модель РФ № 131874. Устройство для измерения крутящего момента трехфазного асинхронного электродвигателя/ Дементьев Ю.Н., **Умурзакова А.Д.** Опубликовано 27.08.2013, Бюл. 24.

24. Патент на полезную модель РФ № 133314. Устройство для измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя/ Дементьев Ю.Н., **Умурзакова А.Д.** Опубликовано 10.10.2013, Бюл. 28.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618084. Расчет электромагнитного момента асинхронного электропривода/ Дементьев Ю.Н., **Умурзакова А.Д.**, Удут Л.С. В реестре программ для ЭВМ 08.08.2014.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618091. Расчет электромагнитного момента асинхронного электропривода с учетом широтно-импульсной модуляции/ Дементьев Ю.Н., **Умурзакова А.Д.**, Удут Л.С. В реестре программ для ЭВМ 08.08.2014.

27. Патент на изобретение РФ № 2525604. Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя/ Дементьев Ю.Н., **Умурзакова А.Д.**, Мельников В.Ю. Опубликовано 20.08.2014., Бюл. № 23.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614817. Оценка расчета механических координат асинхронного электропривода/ Дементьев Ю.Н., **Умурзакова А.Д.** В реестре программ для ЭВМ 22.05.2013.

Личный вклад автора

Публикации [10, 11, 15, 18] выполнены без соавторства. В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: определение аналитических выражений для моделей косвенного контроля механических переменных АД [1-3, 6-9, 12, 19, 20, 22-28] (60%), определение описания имитационных моделей косвенного контроля механических переменных АД [4, 5, 13, 14, 16,17, 21] (60%).