

На правах рукописи



Котин Денис Алексеевич

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО
УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет"

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Панкратов Владимир Вячеславович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Зиновьев Геннадий Степанович

доктор технических наук, профессор Гарганеев Александр Георгиевич

Ведущая организация: Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится "18" ноября 2010 г., в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан "15" октября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



Н.И. Бородин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время Россия, как и весь мир, активно переходит на использование регулируемого по скорости электропривода (ЭП) переменного тока и, в частности, систем на базе асинхронных двигателей. При этом наибольшее распространение получает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АДКЗР). Причины тому – высокая надежность и меньшая стоимость в сравнении с другими типами электрических машин, а реализация системы векторного управления АДКЗР обеспечивает регулировочные характеристики ЭП, близкие к характеристикам ЭП постоянного тока. Как правило, электроприводами на базе серийных АДКЗР оснащаются механизмы, не требующие глубокого регулирования частоты вращения (не более 100:1) и не имеющие “специфических” режимов работы. Такие механизмы (компрессоры, вентиляторы, конвейеры, мельницы, прессы и т.п.) принято называть общепромышленными.

Проведенный анализ действующего электрооборудования отечественных промышленных предприятий также показал довольно широкое применение асинхронных двигателей с фазным ротором (АДФР) для мощных (более 300 кВт) механизмов с тяжелыми условиями пуска (ЭП подъемно-транспортных механизмов, ЭП главного движения вращающихся цементных печей и пр.). На сегодняшний день управление производственным процессом на основе данных электромеханических систем осуществляется путем введения в цепь ротора двигателя добавочных активных сопротивлений. Такой способ регулирования в наше время себя исчерпал в силу энергетической неэффективности. Выходом из сложившейся ситуации может стать применение систем управления высоковольтными АДФР по схеме асинхронизированной синхронной машины (АСМ) с векторным управлением по цепям ротора.

Большой вклад в решение задач исследования и построения систем управления ЭП переменного тока внесли выдающиеся отечественные и зарубежные ученые – М.М. Ботвинник, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.М. Вейнгер, А.Б. Виноградов, Г.В. Грабовецкий, Л.Х. Дацковский, Д.Б. Изосимов, Н.Ф. Ильинский, В.И. Ключев, Г.Б. Онищенко, В.В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, О.В. Слежановский, Ю.Г. Шакарян, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, G.M. Asher, F. Blashke, W. Flöter, J. Holtz, W. Leonard, T.A. Lippo, D.W. Novotny, H. Kubota и др.

Для реализации систем векторного управления необходимо иметь информацию о полном векторе координат состояния асинхронной машины. При этом информацию о недоступных прямому измерению регулируемых координатах общепромышленного ЭП (частота вращения ротора, компоненты и угловое положение вектора потокосцеплений) целесообразно оценивать с помощью быстродействующих устройств идентификации. ЭП, в структуре системы управления которых присутствуют подсистемы идентификации неизмеряемых координат, получили название “бездатчиковые” (sensorless). Большинство наи-

более известных структур алгоритмов идентификации в том или ином виде используют математическую модель электромагнитных процессов в электрической машине. Это неизбежно приводит к вхождению параметров схемы замещения двигателя в математическую модель идентификатора, а они, как известно, в зависимости от режимов работы ЭП могут меняться в довольно широких диапазонах. Решением обозначенной проблемы становится разработка алгоритмов идентификации неизмеряемых координат состояния асинхронного ЭП, адаптивных к дрейфу параметров объекта управления.

Особенно актуальна задача построения отечественных современных импортозамещающих систем управления частотно-регулируемым асинхронным ЭП для подъемно-транспортных механизмов как наиболее сложных, с точки зрения режимов работы, объектов автоматического управления.

Целью диссертационной работы является построение на единой методической основе и исследование адаптивных алгоритмов идентификации неизмеряемых координат для систем векторного управления электроприводами на базе АДКЗР и АДФР, имеющих расширенную рабочую область и удовлетворяющих основным требованиям к ЭП подъемно-транспортных механизмов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **задачи**.

1. Обосновать математическую модель управляемой по ротору асинхронизированной синхронной машины, адекватную задаче построения системы регулируемого ЭП, определить управляющие воздействия и соответствующие им регулируемые координаты.

2. Разработать и исследовать структуры наблюдателя опорного вектора потокосцеплений АСМ, не содержащие “открытых” (разомкнутых) интегрирующих звеньев, и синтезировать идентификатор частоты вращения ротора АДФР, не имеющий статической ошибки вычисления скорости.

3. Разработать и исследовать алгоритм адаптации идентификатора вектора потокосцеплений и частоты вращения ротора АДКЗР к изменениям величины активного сопротивления статора, не требующий инъекции тестовых воздействий и имеющий расширенную область устойчивости. Дать рекомендации по его применению.

4. Экспериментально подтвердить на примерах ЭП подъема работоспособность разработанных бездатчиковых алгоритмов векторного управления АДКЗР и АДФР.

Для решения поставленных задач используются методы современной теории автоматического управления, положения теории электропривода, аналитические методы расчета, основанные на применении аппарата дифференциальных уравнений и передаточных функций. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов осуществляется методом цифрового моделирования в пакете программ Matlab 6.5 – Simulink 4.0, и путем физического эксперимента с использованием преобразователей частоты (ПЧ), разрабатываемых предприятием ЗАО “ЭРАСИБ” (г. Новосибирск).

Научная новизна основных результатов диссертации заключается в следующем.

1. Предложен комплекс структурно отличных друг от друга вариантов построения идентификатора вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АСМ для бездатчиковых систем регулируемого электропривода. Проанализированы их преимущества и недостатки, даны рекомендации по практическому применению.

2. Разработана методика структурно-параметрического синтеза адаптивного к изменениям активного сопротивления статора идентификатора частоты вращения ротора АДКЗР, построенного на основе наблюдателя полного порядка (НПП). При разработке алгоритма были решены проблемы, присущие существующим аналогам, а также расширена область устойчивости. Полученный алгоритм работоспособен во всех четырех квадрантах плоскости механических характеристик ЭП без инъекции в двигатель дополнительных тестовых воздействий. Предложенная методика может послужить основой для синтеза других типов идентификаторов частоты вращения, нечувствительных к изменениям параметров.

Практическая ценность результатов диссертации состоит в следующем.

Разработанные алгоритмы текущей идентификации относятся к классу пассивных, поскольку не вносят искажений в спектр напряжения, формируемого на выходе ПЧ, и не требуют дополнительных энергетических затрат. Оценки вектора потокосцеплений, частоты вращения ротора, активного сопротивления статора, являющиеся результатом работы предложенных алгоритмов, предполагают прямое измерение только электрических величин, фигурирующих в структуре полупроводникового преобразователя частоты. Синтезированные алгоритмы проверены экспериментально, внедрены в производство и используются для построения на их основе систем частотно-регулируемого общепромышленного асинхронного ЭП, не содержащего датчиков магнитного состояния и координат механического движения электрической машины, а также ЭП подъема, специфика работы которых обязывает выделять их из класса общепромышленных.

На защиту выносятся:

1. Алгоритмы текущей идентификации вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АДФР.

2. Алгоритм адаптации идентификатора частоты вращения ротора АДКЗР к изменениям величины активного сопротивления статора, имеющий расширенную область устойчивости без инъекции в двигатель тестовых воздействий.

3. Результаты экспериментальных исследований и внедрения разработанных алгоритмов управления асинхронными ЭП в изделия предприятия ЗАО “ЭРАСИБ” (г. Новосибирск).

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в системах управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов производства ЗАО “ЭРАСИБ” (г.

Новосибирск), а также используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских научных конференциях молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации” НТИ-2007, НТИ-2008 (г. Новосибирск, 2007, 2008 гг.); международных научно-технических конференциях “Электромеханические преобразователи энергии” ЭПЭ-2007, ЭПЭ-2009 (г. Томск, 2007, 2009 гг.); на третьей научно-технической конференции с международным участием “Электротехника, электромеханика, электротехнологии” ЭЭЭ-2007 (г. Новосибирск, 2007 г.); на IX международной конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения” АПЭП-2008 (г. Новосибирск, 2008 г.); на четвертой научно-технической конференции с международным участием “Электротехника, электромеханика, электротехнологии” ЭЭЭ-2009 (г. Новосибирск, 2009 г.); на VI международной (XVII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (г. Тула, 2010 г.).

Работа была удостоена гранта на конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению “Энергетика и энергосбережение” в г. Томск, 2006 г.; а также гранта администрации Новосибирской области для выполнения инновационной научной разработки по направлению “Электротехнические комплексы и системы”, г. Новосибирск, 2007 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 16 печатных работ, 4 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК, 1 – в сборнике научных трудов, 11 – материалы научных конференций.

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в постановке частных задач исследования, выполнении расчетов, разработке методик структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления и идентификации, исследовании синтезированных алгоритмов методом численного моделирования, анализе полученных результатов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автором осуществлены постановка задач исследования, выбор методов их решения и анализ результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Содержит 135 стр. основного текста, включая 62 рисунка, 6 таблиц, и библиографический список из 71 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; проведен обзор современных способов управления асинхронными ЭП; описаны требования, предъявляемые к ЭП подъемно-транспортных механизмов; сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая ценность основных полученных результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена математическому описанию электромагнитных процессов в трехфазной машине двойного питания (МДП), формулировке законов векторного управления АДКЗР и АДФР, анализу текущего состояния проблемы бездатчикового векторного управления асинхронными ЭП.

Первый раздел главы включает в себя описание способа преобразования фазных электромагнитных переменных МДП, приводятся примеры прямого и обратного переходов от модели трехфазной МДП к эквивалентной двухфазной машине. Рассмотрено математическое преобразование статорных и роторных переменных МДП при переходе к вращающейся с произвольной угловой скоростью системе координат.

При общепринятых допущениях получена векторно-матричная математическая модель эквивалентной двухфазной МДП в ортогональной системе координат вращающейся в пространстве с произвольной угловой скоростью ω_k :

$$\mathbf{U}_s = R_s \mathbf{I}_s + \frac{d\mathbf{\Psi}_s}{dt} + \omega_k \mathbf{D}\mathbf{\Psi}_s, \quad \mathbf{U}_r = R_r \mathbf{I}_r + \frac{d\mathbf{\Psi}_r}{dt} + (\omega_k - \omega_e) \mathbf{D}\mathbf{\Psi}_r, \quad (1)$$

где $\mathbf{\Psi}_s, \mathbf{\Psi}_r, \mathbf{U}_s, \mathbf{U}_r, \mathbf{I}_s, \mathbf{I}_r$ – двумерные алгебраические векторы-столбцы потокосцеплений, напряжений, токов статора и ротора вида

$\mathbf{X}_{s(r)} = [x_{s(r)1} \quad x_{s(r)2}]^T$; $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица поворота вектора на плоскости

на угол $\pi/2$; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора МДП; $\omega_e = d\gamma_e/dt$ – электрическая частота вращения ротора, равная произведению геометрической угловой скорости ω на число пар полюсов p_n ;

и обобщенная формула электромагнитного момента машины:

$$M_e = p_n (\alpha \mathbf{I}_s^T \mathbf{D}\mathbf{\Psi}_s + (\alpha - 1) \mathbf{I}_r^T \mathbf{D}\mathbf{\Psi}_r), \quad (2)$$

где α – произвольное действительное число.

При пренебрежении влиянием нелинейности кривой намагничивания на характер электромагнитных переходных процессов, определены выражения для векторов потокосцеплений статора и ротора МДП:

$$\mathbf{\Psi}_s = L_s \mathbf{I}_s + L_m \mathbf{I}_r, \quad \mathbf{\Psi}_r = L_r \mathbf{I}_r + L_m \mathbf{I}_s, \quad (3)$$

где L_s, L_r, L_m – индуктивности статора, ротора и главная индуктивность МДП.

В результате преобразования уравнений (1), (2), (3) и дополнения их уравнением механического движения ЭП получены математические модели АДКЗР в координатах состояния “токи статора – потокосцепления ротора” и АДФР в координатах состояния “токи ротора – потокосцепления статора”, как объектов векторного управления. Математические модели АДКЗР и АДФР рассмотрены как в неподвижной декартовой системе координат (α, β) , так и в ориентированной по вектору потокосцеплений системе координат (d, q) .

Во втором разделе главы, при пренебрежении “неидеальностями” силового источника питания, сформулированы общие принципы векторного управления АДКЗР и АДФР.

Для этого рассмотрена модель статики АДКЗР в ориентированной по вектору потокосцеплений ротора системе координат, из которой следует, что воздействием на поперечную составляющую тока статора осуществляется управление электромагнитным моментом двигателя, а воздействием на продольную составляющую тока статора – управление магнитным состоянием электрической машины. При этом система векторного управления (СВУ) может строиться по принципу подчиненного регулирования координат.

Также рассмотрена модель статики АДФР в ориентированной по вектору потокосцеплений статора системе координат, из которой следует, что воздействием на поперечную составляющую тока ротора осуществляется управление электромагнитным моментом АСМ, а магнитное состояние машины, определяемое в основном напряжением статора, может корректироваться в соответствии с требуемым режимом работы ЭП воздействием на продольную составляющую вектора токов ротора. При этом СВУ АСМ может строиться по принципу подчиненного регулирования координат.

Здесь же рассматриваются способы автоматического ориентирования вектора управляющих воздействий по направлению магнитного поля двигателя. При непосредственном полеориентировании определяются компоненты вектора потокосцеплений в неподвижной системе координат (α, β) , через которые затем определяются мгновенные значения направляющих косинуса и синуса ориентирующего вектора, используемые в преобразовании координат. При косвенном полеориентировании вычисляется оценка фазы вектора потокосцеплений, которая и формирует текущую информацию о положении полеориентированной системы координат относительно неподвижной.

В третьем разделе первой главы рассматриваются опубликованные и доступные для изучения методы текущей идентификации неизмеряемых координат, необходимых для реализации законов векторного управления асинхронной машиной. Анализируются известные алгоритмы адаптивного управления с идентификацией существенно переменных параметров электрической машины.

Большинство методов, описанных как в зарубежной, так и в отечественной научно-технической литературе, основаны на математических моделях электромагнитных процессов, протекающих в асинхронной машине. Все они совмещают вычисление оценки частоты вращения с вычислением модуля и углового положения ориентирующего вектора потокосцеплений. Друг от друга они отличаются точностью вычисления скорости, чувствительностью к дрейфу параметров, входящих в математическую модель идентификатора, способностью функционировать в характерных областях на плоскости механических характеристик асинхронного двигателя.

В качестве наиболее перспективных в плане практической реализации определены алгоритмические структуры алгоритмов идентификации типа адап-

тивная система с задающей моделью и наблюдатель полного порядка. Именно на них будет заострено внимание автора в следующих главах диссертации.

Необходимость адаптации алгоритмов идентификации неизмеряемых координат к дрейфу параметров математической модели объекта, безусловно, является актуальной задачей при построении бездатчиковых СВУ асинхронными ЭП. Однако широко известные на сегодня их структуры обладают рядом недостатков – неустойчивость алгоритма адаптации при низких частотах вращения и в генераторных режимах; появление статической ошибки вычисления скорости на холостом ходу. Решение поставленного круга проблем является одной из задач диссертационного исследования и выполнено в следующих главах работы.

Во второй главе приводится методика структурного синтеза и исследование алгоритма текущей идентификации частоты вращения и опорного вектора потокосцеплений ротора АДКЗР. Идентификатор строится на основе структуры АСЗМ.

Математическая модель алгоритма текущей идентификации частоты вращения и вектора потокосцеплений ротора использует модель АДКЗР в координатах состояния “токи статора – потокосцепления ротора” в системе координат (α, β) , жестко связанной со статором:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\Psi}_r^u &= k_r^{-1} \left(\int (\mathbf{U}_s - R_s \mathbf{I}_s) dt - L_{\sigma e}^s \mathbf{I}_s \right), \\ \hat{\Psi}_r^c &= \frac{1}{T_r} (L_m \mathbf{I}_s - \hat{\Psi}_r^c) + \hat{\omega}_e \mathbf{D} \hat{\Psi}_r^c, \\ \hat{\omega}_e &= k_n (\hat{\Psi}_r^u \times \hat{\Psi}_r^c) + k_u \int (\hat{\Psi}_r^u \times \hat{\Psi}_r^c) dt, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где символом $\hat{}$ обозначены оценки соответствующих величин; $L_{\sigma e}^s = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r}$ – эквивалентная индуктивность рассеяния машины, приведенная к цепи статора;

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени роторной цепи

АДКЗР; $k_r = \frac{L_m}{L_r}$. Верхний индекс указывает на то, по какой модели, статорной

(потенциальной) или роторной (токовой), вычисляется соответствующая оценка вектора потокосцеплений ротора. Поскольку первое уравнение приведенной выше системы не содержит текущего значения частоты вращения ротора, статорная модель принимается в качестве эталонной (задающей – ЭМ), тогда как роторную модель, требующую наличия информации о частоте вращения ротора, рассматриваем как настраиваемую (адаптивную – НМ).

Как видно из системы (4), оценка вектора потокосцеплений может быть вычислена как по первому уравнению АСЗМ (модели цепи статора – МЦС), так и по второму (модели цепи ротора – МЦР). Идея рассматриваемого метода

идентификации частоты вращения заключается в сведении к нулю разности фаз между двумя оценками этой величины посредством пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора, формирующего оценку электрической частоты вращения ротора $\hat{\omega}_e$. Если условие $\arg(\hat{\Psi}_r^u) = \arg(\hat{\Psi}_r^c)$ выполняется, и параметры двигателя заданы верно, то оценка электрической частоты вращения ротора имеет истинное значение. Структурная схема данного алгоритма идентификации представлена на рис. 1.

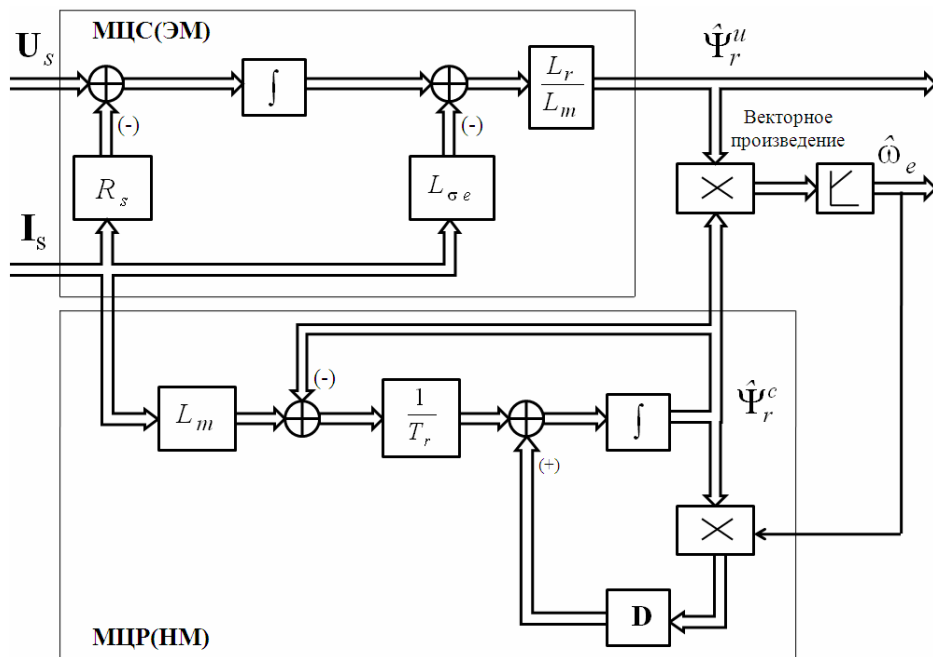


Рис. 1. Структурная схема идентификатора частоты вращения, построенного по принципу АСЗМ

В диссертационной работе предлагаются две авторские методики синтеза регулятора АСЗМ: первая – на основе линеаризованной математической модели АСЗМ; вторая – исходя из теоремы об асимптотической устойчивости систем автоматического регулирования второго метода Ляпунова.

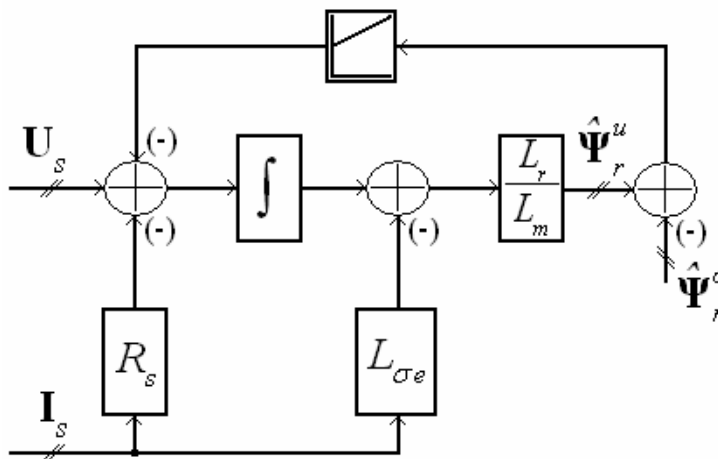


Рис. 2. Стабилизация МЦС

Недостаток идентификатора скорости, построенного по методике АСЗМ: эталонная модель является нейтрально устойчивой, т.к. два интегратора, не охваченные обратной связью, обуславливают нулевой корень характеристического уравнения кратности два. Для того чтобы сделать идентификатор устойчивым асимптотически, стабилизацию модели цепи статора предлагается осуществляется охватом интегратора отрицательной обратной связью и введением в нее ПИ-регулятора, синтез которого ведется по линеаризованному контуру регулирования алгебраической суммы векторов потокосцеплений. Стабилизированная таким образом модель цепи статора изображена на рис. 2.

Наиболее критичными параметрами для работы бездатчиковой СВУ с идентификатором частоты вращения и вектора потокосцеплений ротора являются активное сопротивление статора, эквивалентная индуктивность рассеяния, постоянная времени ротора АДКЗР. Влияние главной индуктивности машины сказывается только тогда, когда меняется ток намагничивания, а это имеет место только в ЭП с двухзонным регулированием. Активное сопротивление статора изменяется в процессе нагрева и охлаждения машины, особенно это чувствительно “внизу” диапазона регулирования скорости. Отклонение значения эквивалентной индуктивности рассеяния от истинной величины наиболее критично “вверху” диапазона регулирования скорости. Влияние отклонения постоянной времени ротора проявляется в возникновении статической ошибки вычисления скорости.

В третьей главе рассматриваются возможные для практической реализации структуры идентификаторов опорного вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АСМ. Приводятся структуры с измерением статорных переменных и без измерения таковых.

При возможности непосредственного измерения токов и напряжений статора АСМ для вычисления углового положения ориентирующего вектора потокосцеплений статора в системе координат, неподвижной относительно ротора, и для текущей идентификации частоты вращения ротора можно воспользоваться принципом АСЗМ. Математическая модель предложенного идентификатора строится по уравнениям роторной цепи и статорной цепи МДП в неподвижных относительно ротора (α, β) и статора (α_r, β_r) декартовых системах координат:

$$\left. \begin{aligned} L'_{\sigma e} \dot{\mathbf{I}}_r &= -R_r \mathbf{I}_r - k_s \dot{\Psi}_s^{rr} + \mathbf{U}_r, \\ \mathbf{U}_s &= R_s \mathbf{I}_s + \frac{d\Psi_s^s}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В системе (3.1) приняты следующие обозначения: Ψ_s^{rr} – вектор потокосцеплений статора неподвижный относительно ротора МДП; Ψ_s^s – вектор потокосцеплений статора неподвижный относительно статора МДП; $L'_{\sigma e} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s}$ –

эквивалентная индуктивность рассеяния машины, приведенная к цепи ротора;

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}.$$

В результате преобразований конечная математическая модель идентификатора частоты вращения ротора и вектора потокосцеплений статора АСМ принимает следующий вид, а структурная схема алгоритма приведена на рис. 3.

$$\left. \begin{aligned} \hat{\Psi}_s^{rr} &= k_s^{-1} \left(\int \left[U_r - R_r I_r - \left(k_n (\hat{\Psi}_s^{rr} - \hat{\Psi}_s^{rs}) + k_u \int (\hat{\Psi}_s^{rr} - \hat{\Psi}_s^{rs}) dt \right) \right] dt - L_{\sigma e}^r I_r \right), \\ \hat{\Psi}_s^s &= \int \left[U_s - R_s I_s - \left(k_n \hat{\Psi}_s^s + k_u \int \hat{\Psi}_s^s dt \right) \right] dt, \\ \hat{\omega}_e &= k_n (\hat{\Psi}_s^{rr} \times \hat{\Psi}_s^{rs}) + k_u \int (\hat{\Psi}_s^{rr} \times \hat{\Psi}_s^{rs}) dt. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

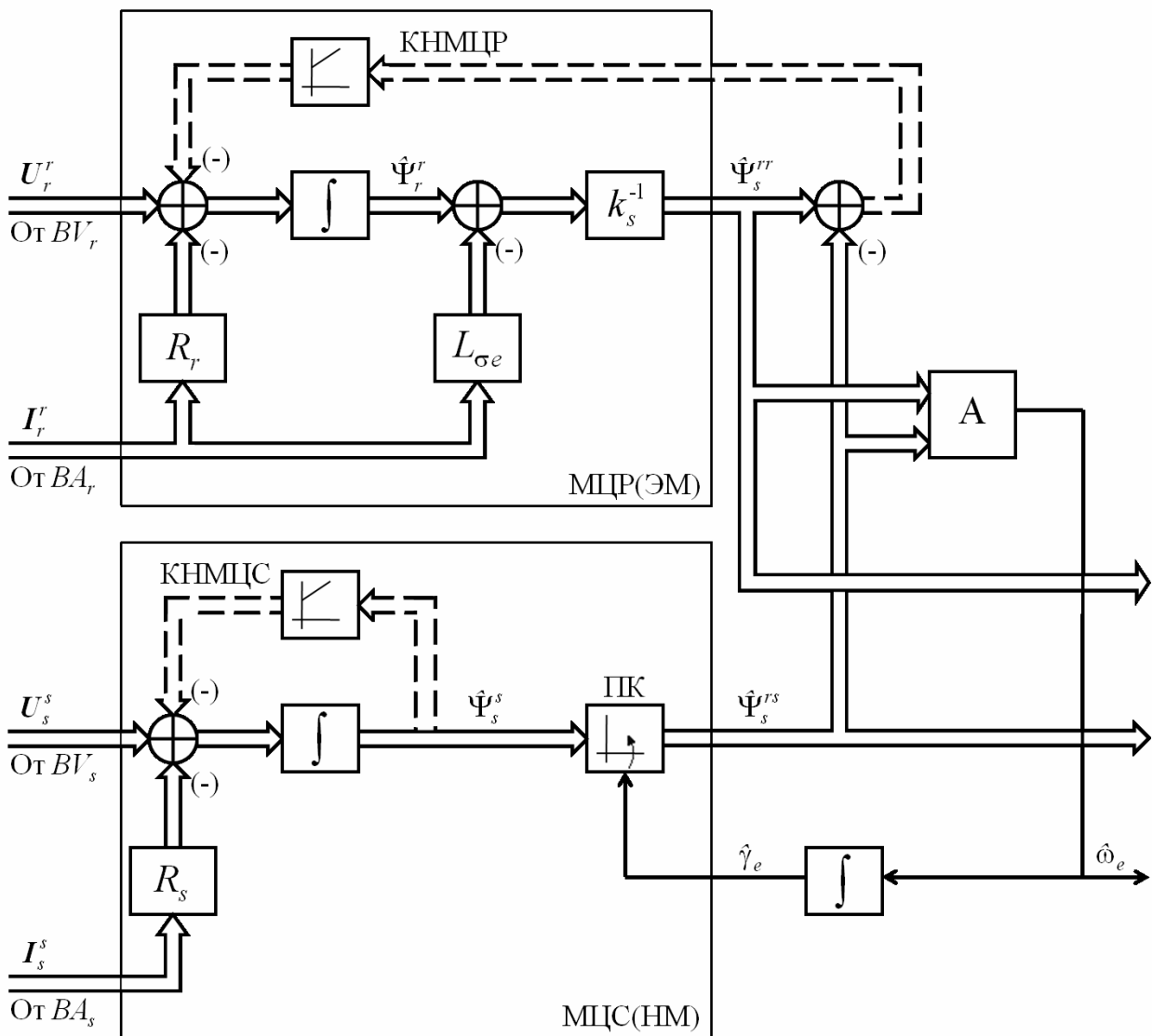


Рис. 3. Структурная схема идентификатора тира АСЗМ с измерением токов и напряжений статора и ротора

На рис. 3 блок ПК обеспечивает приведение оценки вектора потокосцеплений статора в систему координат, неподвижную относительно ротора двигателя. В

данном случае модель цепи ротора – эталонная, модель цепи статора – настраиваемая. Посредством блока А – адаптора вычисляется оценка текущей частоты вращения ротора АСМ в соответствии с законом, приведенным в третьем уравнении системы (6). Методика синтеза регулятора АСЗМ аналогична описанной во второй главе диссертационной работы. Стабилизация моделей цепи статора и ротора осуществляется охватом интеграторов отрицательными обратными связями и введением в обратные связи ПИ-регуляторов (“корректоров нулей” – КН), способных обеспечить максимальную глубину подавления медленно изменяющихся “смещений нулей”, как и для идентификатора неизмеряемых величин АДКЗР.

Кроме структуры типа АСЗМ с измерениями статорных токов и напряжений, в третьей главе работы рассмотрены: структура АСЗМ без измерения напряжений статора; структура АСЗМ с адаптацией по ЭДС статора; ориентация вращающейся системы координат при прямом измерении углового положения ротора АСМ; структура идентификатора углового положения вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора типа НПП. Определены преимущества и недостатки всех перечисленных выше структур.

Отдельно в третьей главе диссертации приводятся методика синтеза и результаты исследования идентификатора углового положения вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АСМ при измерениях только переменных на выходе ПЧ. Это обусловлено тем, что при модернизации ЭП на базе АДФР среднего напряжения (6 или 10 кВ) заказчиком часто ставится задача избежать установки каких-либо датчиков не только на валу, но и на высоковольтной стороне машины. В этих случаях приходится ограничиваться лишь т.н. “клеммными” измерениями переменных, доступных в структуре питающего обмотку ротора преобразователя частоты, и использовать для целей ориентирования по полю только модель цепи ротора двигателя.

Математическая модель идентификатора с “клеммными” измерениями в неподвижной относительно ротора декартовой системе координат описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \hat{\Psi}_s^{rr} &= k_s^{-1} \left(\int \left[U_r - R_r I_r - \left(k_n (\hat{\Psi}_s^{rr} - \hat{\Psi}_s^{rs}) + k_u \int (\hat{\Psi}_s^{rr} - \hat{\Psi}_s^{rs}) dt \right) \right] dt - L_{\sigma e}^r I_r \right) \\ \hat{\omega}_e &= k_n (\hat{\Psi}_s^{rr} \times \hat{\Psi}_s^{rs}) + k_u \int (\hat{\Psi}_s^{rr} \times \hat{\Psi}_s^{rs}) dt. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Структурная схема подсистемы идентификации приведена на рис. 4.

Стабилизация модели цепи ротора осуществляется способом, аналогичным описанному выше. Для вычисления оценки частоты вращения ротора используется следящий тригонометрический анализатор, принцип действия которого заключается в сведении к нулю оценки проекции вектора потокосцеплений статора на поперечную ось полеориентированной системы координат.

Результаты цифрового моделирования системы асинхронизированного синхронного ЭП с подсистемой идентификации при “клеммных” измерениях представлены на рис. 5.

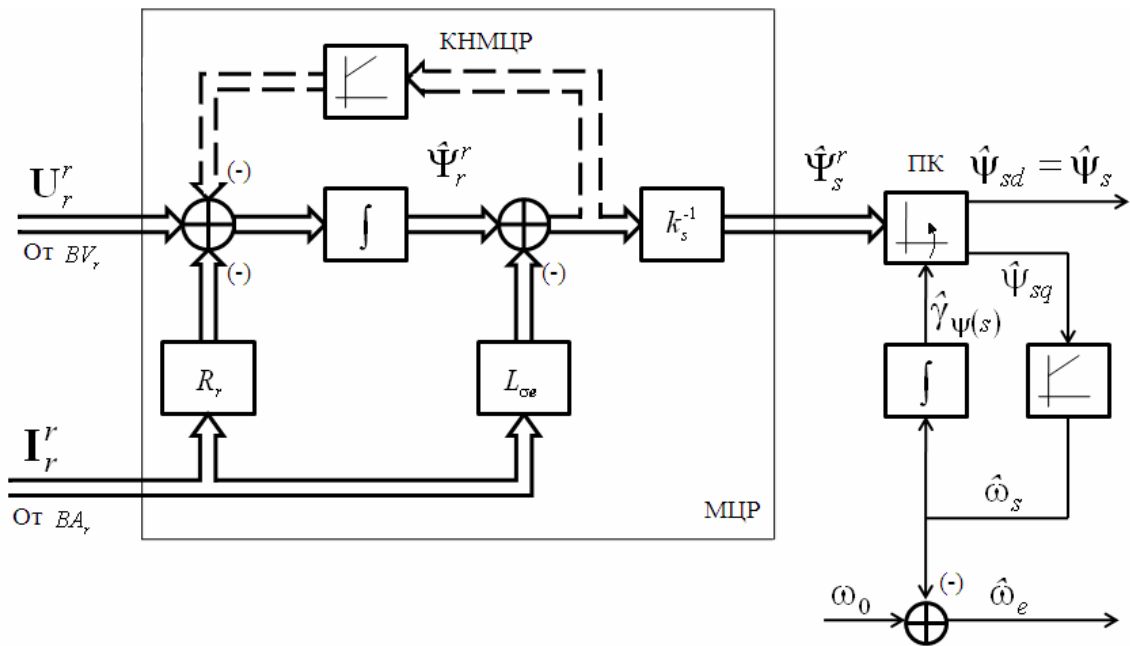


Рис. 4. Структурная схема подсистемы идентификации с “клеммными” измерениями

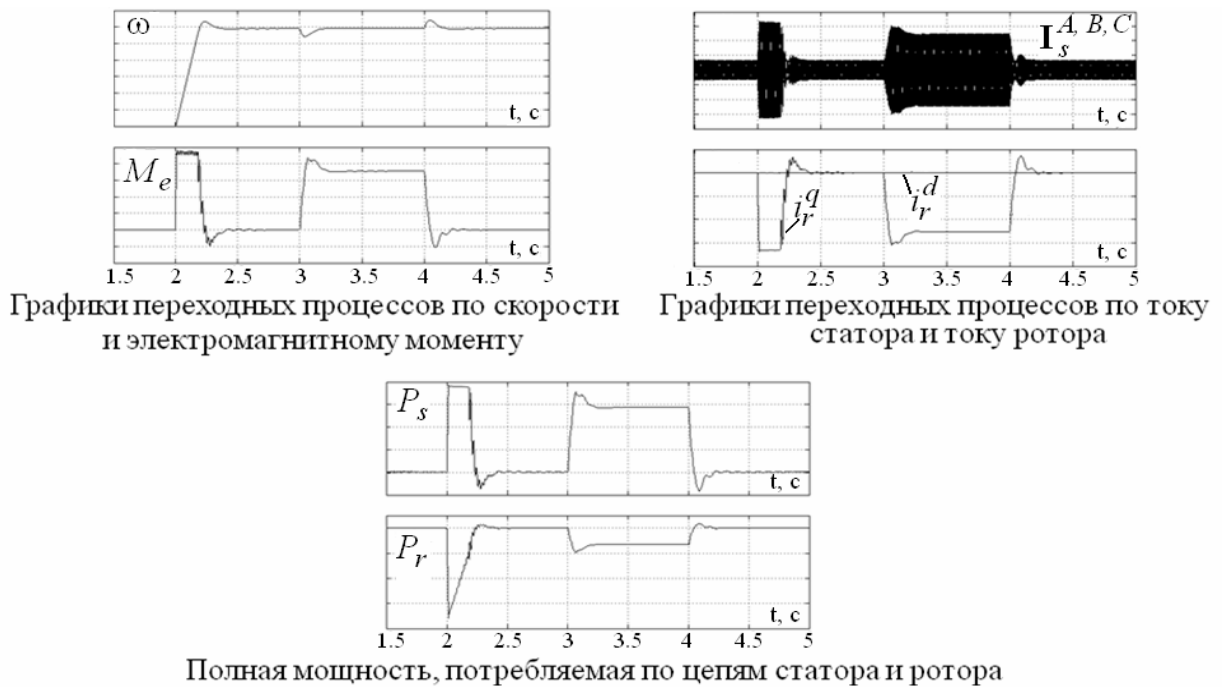


Рис. 5. Результаты цифрового моделирования системы бездатчикового асинхронизированного синхронного ЭП

Четвертая глава диссертации посвящена методике структурно-параметрического синтеза алгоритма бездатчикового векторного управления АДКЗР. Методика базируется на теории функций Ляпунова. Разработанный с ее помощью алгоритм идентификации частоты вращения ротора адаптивен к

изменениям активного сопротивления статора АДКЗР, не требует инъекции в статор двигателя специальных тестовых воздействий и имеет расширенную область устойчивости. В качестве структурной базы алгоритма используется настраиваемая модель типа “наблюдатель полного порядка”.

Математическая модель объекта наблюдения – электромагнитных процессов АД – представлена в неподвижной декартовой системе координат. Структура НПП позволяет совместно с вычислением скорости оценивать еще один параметр, входящий в его математическую модель. В качестве второй идентифицируемой величины предлагается выбрать активное сопротивление статора R_s , отклонение которого наиболее критично с точки зрения устойчивости всей системы векторного управления ЭП при глубоком регулировании скорости.

Согласно теореме Ляпунова адаптивный идентификатор будет устойчив асимптотически “в целом”, если обеспечена отрицательная определенность производной от функции Ляпунова во всем пространстве состояний наблюдателя. Для этого предлагается законы идентификации и адаптации НПП сформировать в следующем виде:

$$\dot{\hat{\omega}}_e = \lambda_1 \left[\left(\frac{h_i^2 k_r}{L_{\sigma e}^s} + \frac{h_{\psi}^2 L_{\sigma e}^s}{k_r} \right) \hat{\Psi}_r^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_i + \frac{h_{\psi}^2 \hat{R}_s}{\omega_{\psi} k_r} \hat{\Psi}_r^T \boldsymbol{\varepsilon}_i \right], \quad \Delta \dot{\hat{R}}_s = \frac{\lambda_2 h_i^2}{L_{\sigma e}^s} \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \hat{\mathbf{I}}_s,$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_i = \hat{\mathbf{I}}_s - \mathbf{I}_s$; $\lambda_1, \lambda_2 - \text{const} > 0$; h_i, h_{ψ} – весовые коэффициенты.

Структурная схема адаптивного НПП приведена на рис. 6.

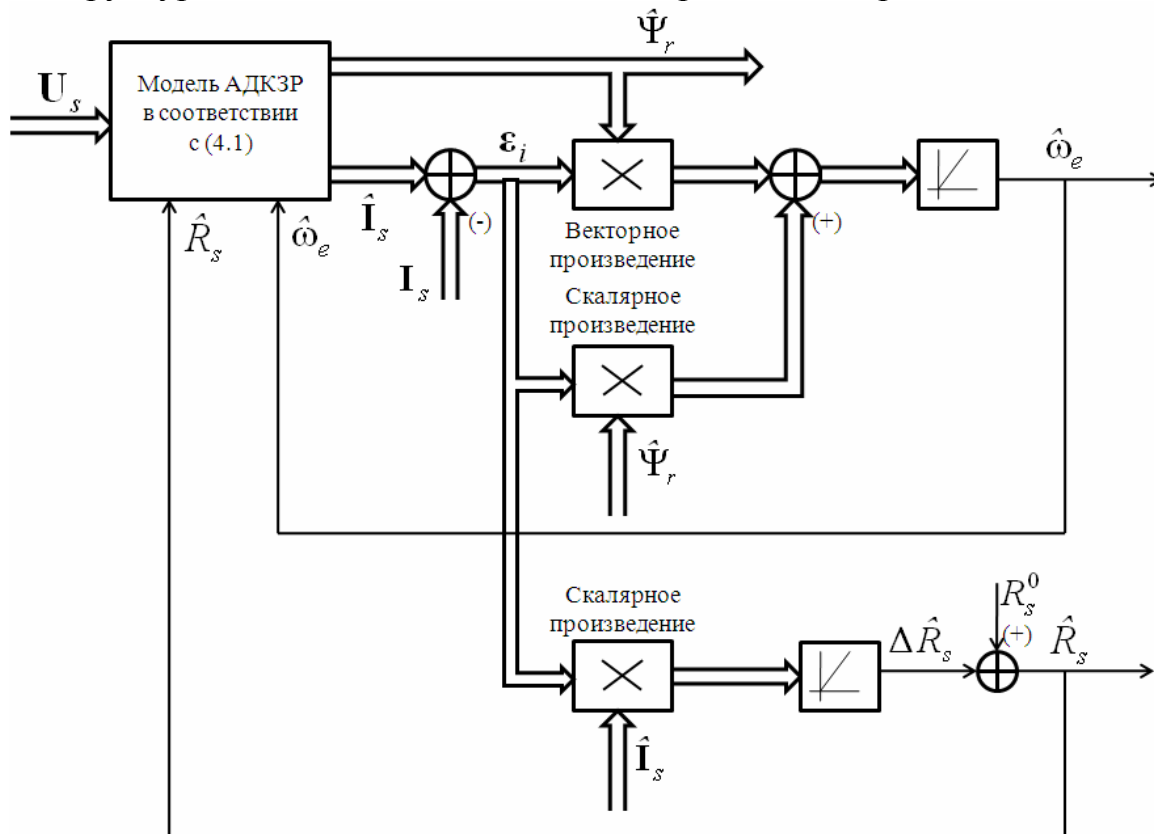


Рис. 6. Структурная схема адаптивного НПП

Разработанная методика структурно параметрического синтеза адаптивного идентификатора скорости на основе НПП обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами. А именно: алгоритм идентификации устойчив при низких частотах вращения (100:1 вниз от номинальной) в двигательных и в генераторных режимах; отсутствует статическая ошибка вычисления скорости на холостом ходу. Главное ограничение на работоспособность алгоритма – неустойчивость в режимах противовключения. Однако такое ограничение принципиально присуще всем алгоритмам, использующим только основную (рабочую) гармонику напряжения и тока. Решить данную проблему можно лишь инъекцией дополнительного мультигармонического тестового воздействия в напряжение (или ток) по продольной оси (оси d), т.е. переходом к активной текущей идентификации. Поэтому в рамках рассматриваемого алгоритма предложено автоматически выявлять режимы противовключения и на их продолжительность “отключать” идентификацию активного сопротивления статора.

Пятая глава посвящена описанию экспериментальной установки по исследованию адаптивного алгоритма бездатчикового векторного управления АСМ.

На предприятии ЗАО “ЭРАСИБ” (г. Новосибирск) при непосредственном участии автора произведены разработка, наладка и лабораторные испытания двух четырехуровневых ПЧ “ЭРАТОН-ФР-630-390-1025”, связанных по управлению и работающих по схеме выравнивания нагрузок с резервированием. Автор также принимал участие в пуско-наладочных работах указанных ПЧ на шахтной подъемной машине ОАО “Приморский ГОК”.

На рис. 7 в качестве примера представлены переходные процессы по оценке частоты скольжения $\hat{\omega}_s$, заданной частоте скольжения ω_s^{des} , оценке модуля вектора потокосцеплений статора $\hat{\psi}_s$, продольной – i_{rd} и поперечной – i_{rq} составляющим тока ротора при пуске ЭП на минимальную частоту вращения с последующим разгоном до номинальной.

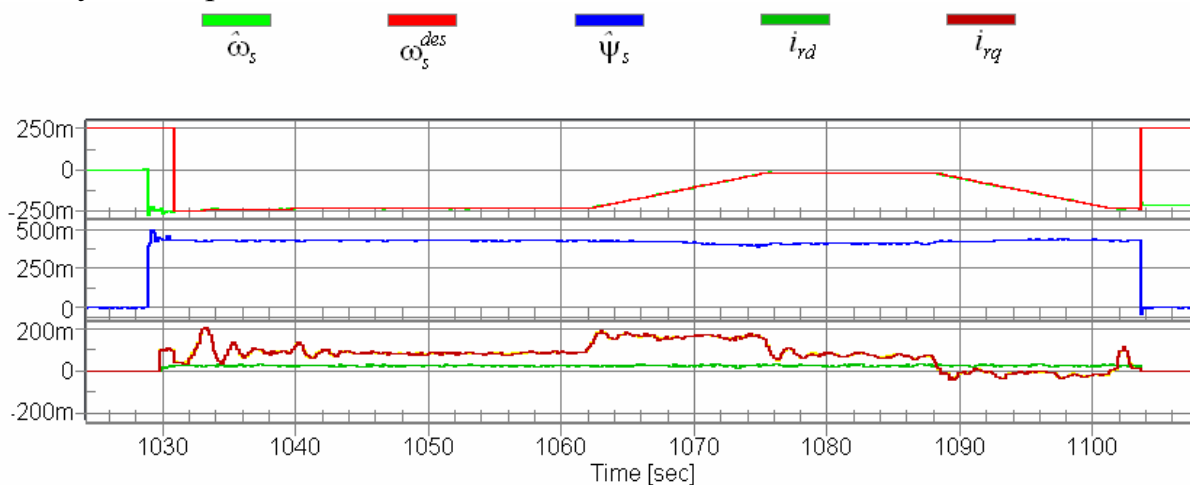


Рис. 7. Результаты экспериментального исследования системы бездатчикового асинхронизированного синхронного ЭП

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, даны подробные рекомендации по их практическому применению.

В приложения вынесены параметры исследуемых методом цифрового моделирования АДКЗР и АДФР; структурные схемы математических моделей в пакете Matlab-Simulink; вспомогательные результаты цифрового моделирования и экспериментальных исследований; акты внедрения и использования результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили получить следующие результаты.

1. Составлено математическое описание управляемой по ротору АСМ в координатах ток ротора – потокосцепление статора, определены управляющие воздействия и соответствующие им регулируемые координаты. Сформулированы принципы векторного управления управляемой по ротору АСМ.

2. На основе принципа АСЗМ синтезированы наблюдатель вектора потокосцеплений ротора, не содержащий в своей структуре “открытых интеграторов”, и идентификатор частоты вращения ротора АДКЗР, не имеющий статической ошибки вычисления скорости. Стабилизация МЦС осуществлялась путем охвата интегратора ООС с введением в нее ПИ – регулятора. Проведено исследование влияния параметров математической модели идентификатора на работоспособность системы ЭП.

3. Предложены структуры алгоритмов идентификации вектора потокосцеплений статора и частоты вращения ротора АДФР, даны рекомендации к их практическому применению. Разработана методика структурно-параметрического синтеза идентификатора при измерениях только переменных на выходе ПЧ, не содержащего в своей структуре “открытых интеграторов”, и не имеющего статической ошибки вычисления скорости. Стабилизация МЦР осуществлялась путем охвата интегратора ООС с введением в нее ПИ – регулятора.

4. Разработан и исследован алгоритм адаптации идентификатора частоты вращения ротора АДКЗР, построенного на основе структуры НПП, к изменениям активного сопротивления статора. При разработке алгоритма решены проблемы, присущие существующим аналогам, и без инъекции дополнительных тестовых воздействий расширена область устойчивости. Предложенный алгоритм является четырехквadrантным, работоспособен в двигательном режиме с диапазоном регулирования скорости не ниже 100:1, а в генераторном – не ниже 50:1. Предложенная методика может быть основой для синтеза других типов идентификаторов частоты вращения, нечувствительных к изменениям параметров.

5. Работоспособность разработанных алгоритмов подтверждена экспериментально. Выносимые на защиту алгоритмы управления асинхронными ЭП

получили реализацию в ПЧ “ЭРАТОН-М5” и “ЭРАТОН-ФР” серийно выпускаемых предприятием ЗАО “ЭРАСИБ” (г. Новосибирск) и активно эксплуатируются на механизмах главного и вспомогательного подъемов ОАО “Братский алюминиевый завод” и ОАО “Приморский ГОК”.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

**Работы, опубликованные в центральных журналах,
рекомендованных списком ВАК:**

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

2. *Панкратов В.В.* Бездатчиковый асинхронизированный синхронный электропривод с векторным управлением / *В.В. Панкратов, Д.А. Котин* // *Электротехника*. – 2009. – № 12. – С. 13 – 19.

3. *Панкратов В.В.* Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном синхронном электроприводе / *В.В. Панкратов, Д.А. Котин* // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. – 2010. – №4. – С. 46 – 51.

4. Многодвигательные асинхронные электроприводы с автоматическим выравниванием нагрузок / *В.В. Панкратов, В.Ю. Волков, Е.А. Волкова, Д.А. Котин, Е.С. Тетюшева, Т.А. Хныкова* // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2008. – №6. – С. 32 – 37.

Прочие публикации:

5. *Котин Д.А.* Структурно-параметрический синтез идентификатора частоты вращения ротора асинхронного электропривода вторым методом Ляпунова // *Автоматизированные электромеханические системы: сб. научных трудов; под общ. Ред. В.Н. Аносова*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 101 – 107.

6. *Котин Д.А.* Разработка и исследование системы векторного управления машиной двойного питания / *Д.А. Котин, В.В. Панкратов* // *Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008 в 7 томах. Том 7: Силовая электроника и механотроника. Устройства автоматики и систем управления*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Т. 7. – С. 95 – 100.

7. *Котин Д.А.* Методика синтеза адаптивных алгоритмов “бездатчикового” векторного управления асинхронным электроприводом / *Д.А. Котин, В.В. Панкратов* // *Электротехника, электромеханика, электротехнологии ЭЭЭ-2007: Материалы третьей научно-технической конференции с международным участием*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 51 – 57.

8. *Котин Д.А.* Алгоритмы текущей идентификации координат в асинхронизированном синхронном электроприводе / *Д.А. Котин, В.В. Панкратов* //

Электротехника, электромеханика, электротехнологии ЭЭЭ-2009: Материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 100 – 105.

9. *Котин Д.А.* К вопросу о бездатчиковом векторном управлении электроприводами подъемно-транспортных механизмов / *Д.А. Котин, В.В. Панкратов* // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф., 17 – 19 октября 2007 г., Томск ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2007. – С. 238 – 240.

10. *Котин Д.А.* Синтез алгоритма текущей идентификации координат асинхронизированного синхронного электропривода / *Д.А. Котин, В.В. Панкратов* // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф., 13 – 16 октября 2009 г., Томск ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – С. 228 – 232.

11. *Котин Д.А.* Оптимальное по критерию минимума потерь в меди векторное управление асинхронным двигателем / *Д.А. Котин, А.С. Полосков, И.Д. Пыкин* // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч.-техн. конф., 13 – 16 октября 2009 г., Томск ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – С. 232 – 236.

12. *Котин Д.А.* Разработка и внедрение модернизированных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с цифровым управлением для общепромышленных механизмов / *Д.А. Котин, А.С. Вылцан* // Материалы Всероссийской конференции – конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы “Энергетика и энергосбережение” (Томск, 26 – 29 сентября 2006 г.). – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006. – С. 61 – 68.

13. *Котин Д.А.* Вопросы построения алгоритмов бездатчикового векторного управления асинхронным электроприводом // Наука. Технологии. Инновации – 2005: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – Ч. 3. – С. 179 – 181.

14. *Котин Д.А.* Разработка и исследование адаптивного алгоритма векторного управления общепромышленным асинхронным электроприводом // Наука. Технологии. Инновации – 2006: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – Ч. 3. – С. 90 – 92.

15. *Котин Д.А.* Бездатчиковое векторное управление асинхронными двигателями с фазным ротором для систем электропривода подъемно-транспортных механизмов // Наука. Технологии. Инновации – 2007: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 3. – С. 43 – 45.

16. *Котин Д.А.* Адаптивный алгоритм идентификации частоты вращения ротора асинхронного электропривода // Наука. Технологии. Инновации – 2008: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Ч. 3. – С. 35 – 37.

Подписано в печать 14.10.10. Формат 60x84x1/16
Бумага офсетная. Тираж 120 экз. Печ. л. 1.25.
Заказ №

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20