

На правах рукописи



КУЧЕР ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель:

д.т.н., профессор Панкратов Владимир Вячеславович

Официальные оппоненты:

Зиновьев Геннадий Степанович – д.т.н., профессор, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры электроники и электротехники;

Ланграф Сергей Владимирович – к.т.н., доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры электропривода и электрооборудования.

Ведущая организация: Институт автоматизации и электрометрии

Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «6» декабря 2012 г., в 10.00 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 «2» ноября 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.т.н., профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в России, как и за рубежом, широко внедряются системы регулируемого по скорости электропривода (ЭП) переменного тока, большинство которых построено на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД). Причиной тому является высокая надежность и низкая стоимость АД в сравнении с другими типами электрических машин, при этом реализация векторного управления АД обеспечивает регулировочные характеристики ЭП, не уступающие характеристикам ЭП постоянного тока. Как правило, электроприводами на базе АД оснащаются общепромышленные механизмы, не требующие глубокого (свыше 1:100) регулирования частоты вращения. Это насосы, компрессоры, вентиляторы, мельницы, прессы, конвейеры и подъемно-транспортные механизмы.

Большой вклад в исследование и построение 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, Л.Х. Дацковский, Д.Б. Изосимов, Н.Ф. Ильинский, В.И. Ключев, С.А. Ковчин, А.Е. Козярук, В.А. Мищенко, Г.Б. Онищенко, В.В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, О.В. Слежановский, Ю.Г. Шакарян, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, И.И. Эпштейн, F. Blaabjerg, F. Blaschke, B.K. Bose, W. Flöter, J. Holtz, W. Leonhard, R.D. Lorenz, M.P. Kazmierkowski, T.A. Lipo, K. Matsuse, D.W. Novotny и др.

Одной из главных проблем построения высококачественных систем векторного управления электроприводами на базе АД является необходимость вычисления в реальном масштабе времени (наблюдение) координат опорного вектора потокосцеплений. Эта задача традиционно решается на основе тех или иных математических моделей АД как объекта управления, которые оперируют значениями различных параметров машины. Вместе с тем, даже параметры классической Т-образной схемы замещения двигателя имеют значительный технологический разброс и, более того, изменяются в процессе функционирования ЭП в довольно широких диапазонах, что не позволяет постоянно пользоваться их номинальными значениями, приведенными в справочной литературе или определенными по результатам опытов в лабораторных условиях. Поэтому в адаптивных системах управления электроприводами реализуются автоматические процедуры активной предварительной идентификации начальных значений интервально неопределенных параметров машины, которые затем уточняются путем их текущей идентификации.

Задача наблюдения опорного вектора потокосцеплений и текущей идентификации изменяющихся параметров АД значительно усложняется в так называемых «бездатчиковых» ЭП, не имеющих сенсоров координат механического движения электропривода – скорости и положения ротора. В таких системах приходится опираться исключительно на результаты прямых измерений электрических величин, доступных во внутренней структуре и на выходных клеммах управляемого преобразователя электрической энергии – преобразователя частоты (ПЧ).

Известны три основных подхода к вычислению координат и параметров электрических машин в процессе работы ЭП.

1. Пассивная текущая идентификация на основе анализа информации об основных рабочих гармониках электрических величин.
2. Пассивная текущая идентификация параметров на основе информации о неосновных (относительно высокочастотных) составляющих электрических величин, генерируемых зубцовыми пульсациями магнитного поля или импульсным характером выходного напряжения силового ПЧ.
3. Активная текущая идентификация на основе анализа реакции объекта управления на инжектированные в статор двигателя тестовые воздействия (как правило, периодическую составляющую напряжения или тока по продольной оси магнитного поля ротора).

В большинстве практических разработок предпочтение отдается первому подходу, не связанному с ухудшением энергетических характеристик ЭП, завышением установленной мощности элементов ПЧ, сложными вычислениями и использованием измерительных цепей высокой точности. Однако вследствие изменений параметров диапазоны регулирования скорости в таких ЭП на практике редко достигают значений 1:50 (1:100 – в лабораторных условиях), а в режимах генераторного торможения значительно сужаются.

Целью диссертационной работы является исследование алгоритмов активной предварительной и пассивной текущей идентификации параметров и наблюдения координат асинхронного бездатчикового ЭП, а также построение адаптивных законов векторного управления, расширяющих диапазон регулирования частоты вращения в двигательном и генераторном режимах работы.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**.

1. Разработать беспойсковый алгоритм предварительной идентификации постоянной времени ротора асинхронного двигателя в системах ЭП.
2. Получить условия, при выполнении которых изменяющиеся параметры и неизмеряемые координаты АД принципиально возможно совместно вычислить по измерениям лишь основных гармоник токов и напряжений статора в установившихся режимах работы электропривода.
3. Разработать и исследовать методику совместного синтеза подсистем регулирования и идентификации частоты вращения ротора асинхронного двигателя с адаптацией ЭП к изменениям активного сопротивления статора.
4. Экспериментально исследовать характеристики разработанных алгоритмов в бездатчиковом асинхронном ЭП.

Поставленные задачи решаются с помощью методов современной теории автоматического управления и теории электропривода с использованием математического аппарата дифференциальных уравнений и передаточных функций. Экспериментальное исследование выполнено путем численного моделирования в пакете программ MATLAB – Simulink и физического макетирования.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации по государственному контракту № 13.G36.31.0010 от 22.10.2010 г.

Научная новизна основных результатов диссертации заключается в следующем.

1. Впервые предложена методика анализа корректности задач текущей идентификации неизмеряемых координат и изменяющихся параметров АД в системах частотно-регулируемого ЭП по основным рабочим гармоникам электрических переменных, позволяющая получить условия, при выполнении кото-

рых искомые величины могут быть определены однозначно. Выявлены режимы работы ЭП, в которых однозначное вычисление требуемых величин в процессе их текущей идентификации невозможно. Их признаки могут использоваться для «переключения» структур закона управления.

2. Предложена методика структурно-параметрического синтеза подсистем регулирования и идентификации частоты вращения бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением, отличающаяся возможностью совместного нахождения передаточных функций регулятора и идентификатора скорости. В процессе определения параметров контуров можно задавать и варьировать желаемые динамические характеристики системы управления ЭП, а также обеспечить астатизм системы регулирования скорости по задающему и возмущающему воздействиям.

Практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в следующем.

Предложены два подхода (векторно-матричный и символический) к анализу принципиальной возможности решения (корректности постановки) некоторых имеющих реальный технический смысл задач совместной текущей идентификации параметров и наблюдения координат двигателя в системах частотно-регулируемого электропривода. В результате проведенного исследования выявлены режимы работы ЭП, в которых однозначное вычисление технически целесообразных пар режимных параметров АД в процессе их текущей идентификации невозможно, также даны рекомендации по их применению в частотно-регулируемом ЭП.

Разработаны и экспериментально апробированы инженерная методика расчета параметров адаптивного идентификатора частоты вращения АД, способного обеспечить расширение диапазона регулирования скорости, и простой беспыльный алгоритм активной предварительной идентификации постоянной времени цепи ротора двигателя.

На защиту выносятся следующие основные результаты.

1. Алгоритм активной предварительной идентификации постоянной времени цепи ротора АД в системах частотно-регулируемого ЭП.

2. Методика анализа условий текущей идентифицируемости координат и параметров асинхронного ЭП с использованием матрицы Якоби.

3. Методика синтеза адаптивного идентификатора частоты вращения ротора с текущей коррекцией активного сопротивления обмотки статора АД.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной школе-конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и управление» ИТКСУ-2009 (г. Новосибирск, 2009 г.); на Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2007, НТИ-2009, НТИ-2010 (г. Новосибирск, 2007, 2009, 2010 гг.); на четвертой научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» ЭЭЭ-2009 (г. Новосибирск, 2009 г.); на X Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2010 (г. Новосибирск, 2010 г.); на V Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энер-

гии» ЭПЭ-2011 (г. Томск, 2011 г.); на XV международной конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-2012 (г. Екатеринбург, 2012 г.).

В июне 2012 г. подана заявка о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются при создании систем управления асинхронными электроприводами в ЗАО «ЭРАСИБ» (г. Новосибирск), а также в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета.

Экспериментальные исследования, проведенные в работе, поддержаны грантом по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем», темплан, заявка № 7.559.2011.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, 5 из которых – в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, 1 – в сборнике научных трудов, 8 – в материалах научных конференций.

Личный вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в участии в постановке задач исследований, синтезе алгоритма активной предварительной идентификации постоянной времени ротора АД, выполнении выкладок при определении условий идентифицируемости параметров ЭП. Также соискателем были выполнены постановка задачи, собственно разработка и исследование процедуры структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления и идентификации частоты вращения ротора АД.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 70 наименований и 6 приложений. Она содержит 150 страниц основного текста, включая 65 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы важность и актуальность темы диссертационной работы; приведен обзор классических методов идентификации координат состояния и параметров схемы замещения АД; выявлена необходимость анализа корректности постановки некоторых задач совместной текущей идентификации координат и параметров двигателя; сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна и практическая ценность основных результатов диссертационного исследования.

Первая глава диссертационной работы посвящена математическому описанию асинхронного двигателя как объекта векторного управления. Рассмотрен общий подход к векторному управлению асинхронным электроприводом при питании АД от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

В качестве математической модели электромагнитных процессов в двигателе при общепринятых допущениях использованы известные уравнения электрического равновесия цепей статора и ротора, представленные во вращающейся с произвольной скоростью ортогональной системе координат:

$$\left. \begin{aligned} L_{\sigma e} \cdot \dot{I}_s &= -R_s \cdot I_s - \frac{L_m}{L_r} \cdot \dot{\Psi}_r - \omega_k \cdot D \cdot \left(L_{\sigma e} \cdot I_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_r \right) + U_s, \\ \dot{\Psi}_r &= \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} \cdot I_s - (\omega_k - \omega_e) \cdot D \cdot \Psi_r - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_r. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Система (1) совмещается с выражением для электромагнитного момента и уравнением движения привода:

$$M_e = c \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_s^T \cdot D \cdot \Psi_r, \quad J \cdot \dot{\omega} = M_e - M_c.$$

Здесь: J – суммарный момент инерции ротора двигателя и жестко связанных с ним маховых масс; M_c – приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки; c – коэффициент; I_s, Ψ_r – двумерные векторы-столбцы токов статора и потокосцеплений ротора; $\omega_k = \frac{d\gamma_k}{dt}$ – угловая скорость системы координат;

$\omega_e = \frac{d\gamma_e}{dt}$ – электрическая частота вращения ротора; $D = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица

поворота вектора на угол $\frac{\pi}{2}$; $L_{\sigma e} = L_s - L_m^2/L_r$ – эквивалентная индуктивность рассеяния двигателя; L_m, L_s, L_r – главная взаимная индуктивность машины и

полные индуктивности цепей статора и ротора соответственно; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$, R_r – постоянная времени и активное сопротивление цепи ротора; R_s – активное сопротивление цепи статора.

В системе координат, ориентированной по направлению вектора потокосцеплений ротора уравнения (1) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} L_{\sigma e} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} &= -R_s \cdot i_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\psi_{rm}}{dt} + \omega_\psi \cdot L_{\sigma e} \cdot i_{sq} + U_{sd}(t, \gamma_\psi), \\ L_{\sigma e} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} &= -R_s \cdot i_{sq} - \omega_\psi \cdot \left(L_{\sigma e} \cdot i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rm} \right) + U_{sq}(t, \gamma_\psi), \\ \frac{d\psi_{rm}}{dt} &= \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{sd} - \frac{1}{T_r} \cdot \psi_{rm}, \\ \frac{d\gamma_\psi}{dt} &= \omega_\psi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ψ_{rm}, ω_ψ – евклидова норма (модуль) и мгновенная круговая частота вектора потокосцеплений ротора; i_{sd}, i_{sq} – намагничивающая и моментобразующая компоненты вектора токов статора; ω_s – частота скольжения; U_{sd}, U_{sq} – компоненты вектора напряжений статора:

$$\begin{bmatrix} U_{sd}(t, \gamma_\psi) \\ U_{sq}(t, \gamma_\psi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_\psi & \sin \gamma_\psi \\ -\sin \gamma_\psi & \cos \gamma_\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{s\alpha}(t) \\ U_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{s\alpha} \cdot \cos \gamma_\psi + U_{s\beta} \cdot \sin \gamma_\psi \\ U_{s\beta} \cdot \cos \gamma_\psi - U_{s\alpha} \cdot \sin \gamma_\psi \end{bmatrix}.$$

Также в первой главе детально рассмотрены функциональная и структурная схемы бездатчиковой системы векторного управления АД с непосредственным ориентированием по полю ротора на базе ПЧ с ШИМ. Принцип векторного управления позволяет независимо воздействовать на продольную (i_{sd} – намагничивающую) и поперечную (i_{sq} – активную или моментобразующую) составляющие вектора токов статора для управления магнитным состоянием машины и электромагнитным моментом соответственно.

Вторая глава отражает основные результаты проведенного исследования методов предварительной идентификации параметров схемы замещения АД, а также описание разработанной методики активной предварительной идентификации постоянной времени ротора асинхронного ЭП.

Функция предварительной идентификации параметров двигателя – важная составляющая алгоритмического обеспечения бездатчикового электропривода. В зависимости от ситуации, в ходе предварительной идентификации определяются оценки требуемых параметров АД, которые затем используются в адаптивных идентификаторах неизмеряемых координат как начальные значения (приближения) их настраиваемых параметров. Активная идентификация подразумевает применение специальных тестовых воздействий, пассивная – напротив, основывается только на измерениях электрических переменных в рабочих процессах и на оценках координат состояния, определенных с помощью наблюдателей. В задаче предварительной идентификации предпочтительней именно активные алгоритмы, так как с помощью специальных тестовых сигналов можно сфокусироваться именно на влиянии интересующего параметра, не боясь при этом нарушить ход технологического процесса.

За основу принят следующий известный алгоритм, форма соответствующего тестового воздействия изображена на рис. 1.

1. Предварительная оценка сопротивления статора вычисляется на основе системы уравнений (2), при начальном возбуждении двигателя напряжением $U_{sd} = U_m \cdot 1(t)$ с учетом $\omega_{\psi} = 0$, и с учетом падения напряжения в инверторе. Достаточно точные значения вычисляемых оценок активного сопротивления статора и величины статической составляющей падения напряжения в инверторе можно получить через $(7...10) \cdot T_r$ после приложения тестового напряжения. При этом вследствие дискретного характера выходного напряжения ПЧ измерение тока и фиксация среднего за период дискретизации напряжения должны производиться в моменты времени, когда опорный сигнал ШИМ принимает максимальное или минимальное значения.

2. Идентификация эквивалентной индуктивности рассеяния АД осуществляется при ступенчатом изменении напряжения статора. Показано, что в течение первых пяти периодов ШИМ можно достичь погрешности вычисления эквивалентной индуктивности рассеяния в пределах (1-2)% .

3. Предварительная идентификация индуктивности статора осуществляется при линейном изменении напряжения статора. В момент времени, когда ток намагничивания станет равным измеренному ранее установившемуся значению, из зафиксированных значений напряжения можно найти разницу $\Delta u_{sd,ref}$ (рис. 1), которая затем и используется для предварительного расчета. Показано, что ошибка идентификации индуктивности статора прямо пропор-

циональна ошибке в определении оценки эквивалентного сопротивления статора и ошибке при формировании напряжения инвертором.

4. Идентификация постоянной времени ротора T_r , также производится по экспериментальным данным о переходном процессе тока при ступенчатом изменении напряжения и последующей «линейной заводке».

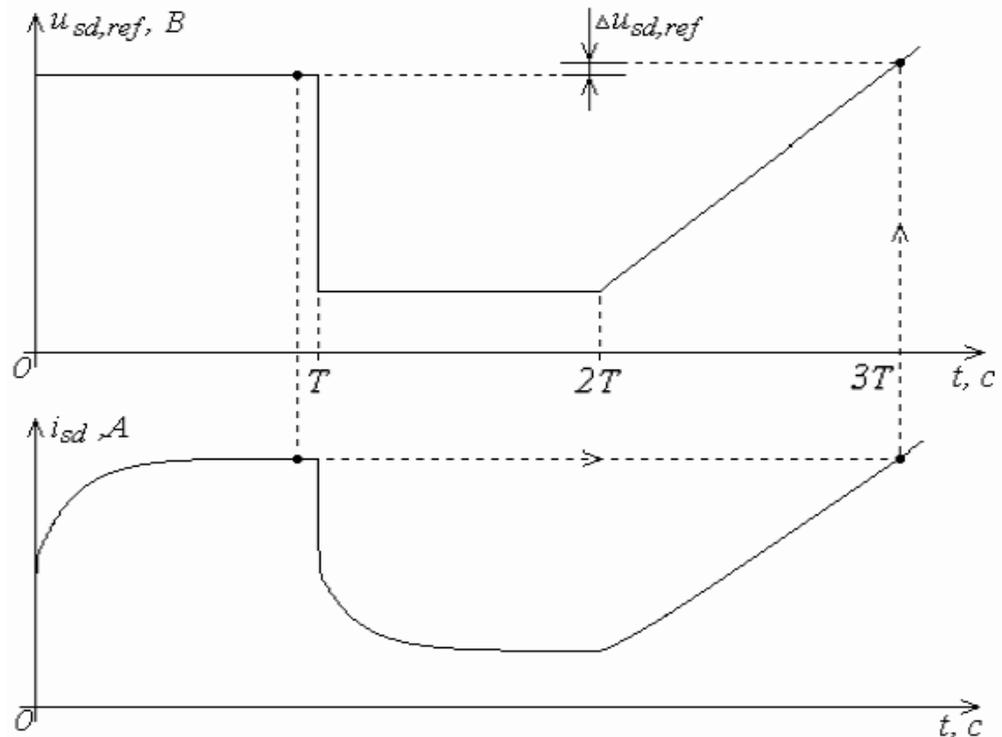


Рис. 1. Форма тестового воздействия по напряжению статора

На примере общепромышленного двигателя 4А200М4У3 мощностью 37 кВт, определено, какую величину составляет $\Delta u_{sd,ref}$.

Расчетное значение перепада напряжения составляет около 1 В, это довольно малая величина, т.к. предел измерений датчиков (прямых или косвенных) фазных напряжений двигателя составляет не менее 500 В. Следовательно, для относительно точного измерения напряжений на уровне 1 В нужно иметь разрешающую способность еще на 2 порядка выше. Такими датчиками электроприводы для целей регулирования никогда не оснащают, дабы не увеличивать стоимость и габариты оборудования. Расчет показывает, чтобы $\Delta u_{sd,ref}$ составляла доступную для измерения датчиками общепромышленной системы ЭП величину, производная напряжения должна быть $\approx 800 \text{ В/с}$, и в свою очередь, линейно нарастающий ток статора по истечении рекомендованного интервала времени $(6..10) \cdot T_r$ достигает недопустимо большой величины, которое не соответствует перегрузочной способности ПЧ по току, которая обычно составляет $(120-150)\%$ от номинального тока статора АД.

В этой связи необходимо использовать другой вид тестового воздействия для предварительной идентификации $L_s \approx L_r$ и постоянной времени ротора асинхронного ЭП, например, гармонического сигнала задающего напряжения.

Суть предлагаемого метода предварительной идентификации параметров АД заключается в определении значений двух точек фазовой частотной характеристики (ФЧХ) и составлении на их основе системы уравнений, из которой можно выразить оценки постоянной времени и активного сопротивления цепи ротора

\hat{R}_r и \hat{T}_r . Измерение относительной фазы гармонического сигнала осуществляется посредством специальной следящей системы – тригонометрического анализатора, методика построения которого предлагалась и неоднократно описывалась в статьях, а также была реализована в серийных промышленных электроприводах производства ЗАО «ЭРАСИБ», таких как «ЭРАТОН-М5» и «ЭРАТОН-ФР».

На основе анализа фазовой частотной характеристики получено алгебраическое уравнение четвертой степени, один из корней которого является величиной \hat{T}_r . По значению \hat{T}_r вычисляется оценка активного сопротивления цепи ротора двигателя. Погрешность полученных значений постоянной времени и активного сопротивления обмотки цепи ротора асинхронного электропривода зависит только от погрешности определения других параметров схемы замещения АД и точности измерения фазы и частоты.

Третья глава диссертации посвящена методике анализа корректности постановки задач текущей идентификации неизмеряемых координат и изменяющихся параметров АД на основе матрицы Якоби. Получены условия совместной идентифицируемости технически целесообразных пар параметров ЭП. Выявлены режимы работы ЭП, в которых однозначное вычисление требуемых величин в процессе их текущей идентификации невозможно. Даны рекомендации по практическому применению полученных результатов.

Основой разработанной методики является система уравнений (1), записанная для синхронной скорости ($\omega_k = \omega_o$), и для установившегося режима работы ЭП. Из нее следует, что

$$U_s = Z \cdot I_s, \quad (3)$$

где $U_s = \begin{bmatrix} U_{sm} \\ 0 \end{bmatrix}$, $I_s = \begin{bmatrix} I_{sm} \cdot \cos \varphi \\ I_{sm} \cdot \sin \varphi \end{bmatrix}$;

U_{sm}, I_{sm} – модули векторов напряжений и токов статора АД;

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{R_s \cdot R_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2) + L_m^2 \cdot \omega_s \cdot \omega_o}{R_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2)} & -\omega_o \cdot (L_m^2 + L_{\sigma e} \cdot L_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2)) \\ \frac{\omega_o \cdot (L_m^2 + L_{\sigma e} \cdot L_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2))}{L_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2)} & \frac{R_s \cdot R_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2) + L_m^2 \cdot \omega_s \cdot \omega_o}{R_r \cdot (1 + \omega_s^2 \cdot T_r^2)} \end{bmatrix}$$

– полное сопротивление двигателя, представленное в матричной форме.

Из условий совместности уравнения (3) могут быть однозначно определены лишь какие-то два неизвестных параметра, входящих в матричное полное сопротивление. При этом необходимым и достаточным условием идентифицируемости каждой возможной пары параметров АД является невырожденность матрицы Якоби для системы (3):

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix},$$

где α_1, α_2 – идентифицируемые параметры АД; $F = \begin{bmatrix} F_1(\alpha_1, \alpha_2) \\ F_2(\alpha_1, \alpha_2) \end{bmatrix}$ – вектор-столбец функций – левая часть уравнения $F = U_s - I_s \cdot Z = 0$.

На основе традиционной для задач векторного управления АД математической модели статики двигателя, представленной в векторно-матричной форме, предложена методика анализа принципиальной возможности решения, иными словами, корректности постановки некоторых имеющих реальный технический смысл задач совместной текущей идентификации координат и параметров двигателя в системе частотно-регулируемого электропривода.

Целью проведенного исследования являлось получение условий совместной идентифицируемости технически целесообразных пар параметров ЭП.

Для бездатчикового асинхронного ЭП, такими параметрами могут быть:

- активное сопротивление обмотки статора и электрическая частота вращения ротора АД (R_s и ω_e) – возможность совместной идентификации R_s и ω_e отсутствует в режиме идеального холостого хода ($\omega_s = 0$), т.е. на синхронной скорости, и при выбеге ($I_{sm} = 0$);
- эквивалентная индуктивность рассеяния и электрическая частота вращения ротора АД ($L_{\sigma e}$ и ω_e) – их возможно совместно идентифицировать во всех режимах работы асинхронного двигателя, кроме режима холостого хода, выбега и режима динамического торможения ($\omega_o = 0$);
- постоянная времени цепи ротора и электрическая частота вращения ротора АД (T_r и ω_e) – данные параметры невозможно однозначно идентифицировать в установившихся режимах работы ЭП по информации об основных рабочих гармониках электрических величин;
- взаимная индуктивность и электрическая частота вращения ротора АД (L_m и ω_e) – условия идентифицируемости и этих параметров совпадают с полученными для пары R_s и ω_e .

Для ЭП с датчиком частоты вращения или угла поворота ротора рассматривалась пара L_m и T_r , используемая для косвенной автоматической ориентации вращающейся системы координат по направлению вектора потокосцеплений ротора посредством модели цепи ротора двигателя. Результат проведенного анализа для выбранной пары такой же, как и в предыдущих случаях.

Предложенная методика анализа корректности постановки задач текущей идентификации неизмеряемых координат и изменяющихся параметров АД в системах частотно-регулируемого ЭП по основным рабочим гармоникам электрических переменных позволяет получить условия, при выполнении которых искомые величины могут быть определены однозначно.

Четвертая глава посвящена структурно-параметрическому синтезу идентификатора частоты вращения и опорного вектора потокосцеплений рото-

ра. Предложена методика совместного синтеза подсистем регулирования и идентификации скорости АД.

Разработан многоэтапный алгоритм идентификации активного сопротивления статора асинхронного ЭП. В основу подхода положены метод адаптивной модели и метод больших коэффициентов, в том числе используется метод разделения движений.

Поскольку ЭП бездатчиковый, возникает необходимость в построении наблюдателя для получения информации о неизмеряемых координатах состояния $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \omega, \gamma_{\psi}$, т.е. их оценок. Наблюдатель является алгоритмом, позволяющим стабилизировать систему, получая требуемые переходные процессы. Используемый адаптивный идентификатор частоты вращения ротора АД основан на методике MRAS – Model Reference Adaptive System (адаптивная система с задающей или эталонной моделью) (рис. 2).

На структурной схеме обозначено:

МЦС – модель цепи статора; МЦР – модель цепи ротора; А – адаптор; КН – корректор нулей МЦС; D – матрица поворота; ТА – тригонометрический анализатор.

Синтез наблюдателя заключается в нахождении параметров адаптора и корректора нулей, представляющих собой пропорционально-интегральные регуляторы, расчет которых осуществляется с помощью модального метода.

Для такой существенно нелинейной системы как асинхронный электропривод в большинстве случаев контур регулирования скорости бездатчикового ЭП синтезируется приближенно, исходя из условий разделения движений с процессами идентификации неизмеряемых координат, что приводит к значительным ограничениям по быстродействию электропривода в целом как по задающему, так и по возмущающему воздействиям.

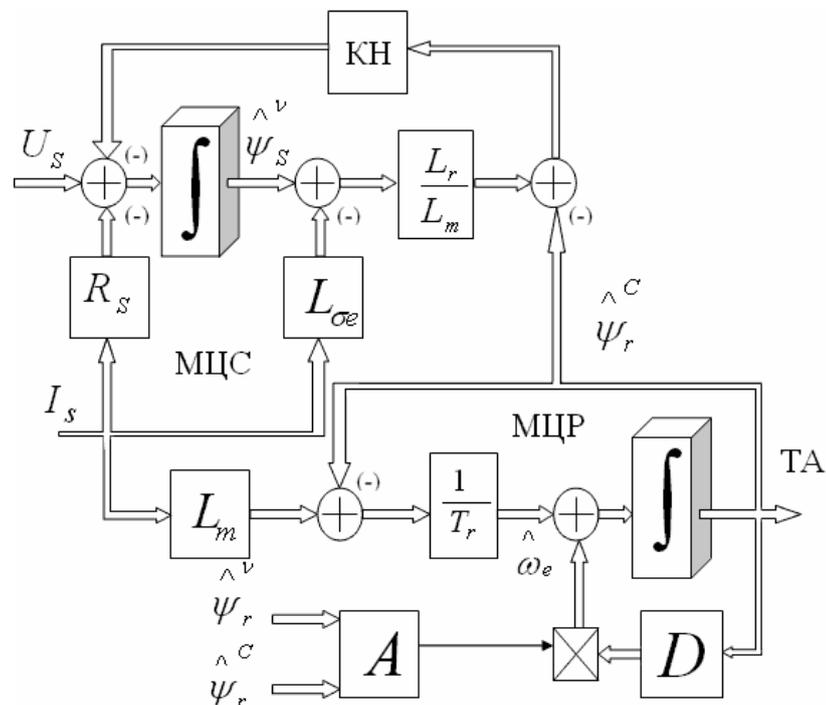


Рис. 2. Структурная схема адаптивного идентификатора частоты вращения

В работе предложена методика совместного структурно-параметрического синтеза регулятора и идентификатора частоты вращения ротора бездатчикового асинхронного электропривода, лишенная указанного выше недостатка. В основу методики положены результаты анализа процессов, протекающих в моделях двигателя и адаптивной системы с эталонной моделью (АСЭМ), представленных в разных вращающихся системах координат. В диссертации это ориентированная по направлению вектора потокосцеплений ротора АД система координат (d,q) и смещенная система, обозначенная как (1,2). Главным допущением является высокое быстродействие (безинерционность) регулируемого источника токов статора двигателя.

Получены следующие уравнения, которые отражают связь между моделью двигателя и настраиваемой системой:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \frac{1}{T_r} \cdot [(i_{s1} \cdot (1 - \cos \Delta\gamma_k) + i_{s2} \cdot \sin \Delta\gamma_k) - \varphi], \\ \Delta\dot{\gamma}_k = \delta + \frac{L_m}{T_r} \cdot \left(\frac{i_{s2}}{\varphi + \psi_r} - \frac{i_{s1}}{\psi_r} \cdot \sin \Delta\gamma_k - \frac{i_{s2}}{\psi_r} \cdot \cos \Delta\gamma_k \right). \end{cases}$$

где $\delta = \hat{\omega}_e - \omega_e$; $\varphi = \hat{\Psi}_r - \Psi_r$ – отклонения; $\Delta\gamma_k$ – угол смещения систем координат (d,q) и (1,2) друг относительно друга.

После преобразований, проведенных при условии, что φ и $\Delta\gamma_k$ малы, когда $\cos \Delta\gamma_k \approx 1$, а $\sin \Delta\gamma_k \approx \Delta\gamma_k$, для системы с задатчиком $i_{s1} = \psi_r^{3ad} / L_m$ получим

$$\begin{cases} (T_r \cdot p + 1) \cdot \varphi(p) = L_m \cdot i_{s2} \cdot \Delta\gamma_k(p), \\ \left(p + \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{i_{s1}}{\psi_r^{3ad}} \right) \cdot \Delta\gamma_k(p) = \delta(p) = \hat{\omega}_e(p) - \omega_e(p). \end{cases}$$

На основе этих уравнений, используя уравнения движения и момента ЭП, построена структурная схема пересекающихся контуров регулирования скорости и идентификатора скорости АД (рис. 3).

Чтобы найти параметры передаточной функции ПИ-регулятора АСЭМ, предлагается приравнять характеристический полином замкнутого контура адаптации к биномиальной стандартной форме. Для получения передаточной функции регулятора скорости используется методика синтеза по возмущающему воздействию, т.е. по требованиям к максимальному динамическому отклонению скорости электропривода при ступенчатом изменении момента сопротивления нагрузки на валу двигателя, к коэффициенту неравномерности вращения (диапазону регулирования) в условиях изменяющихся нагрузок или к интегральной ошибке регулирования (ошибки по положению ротора).

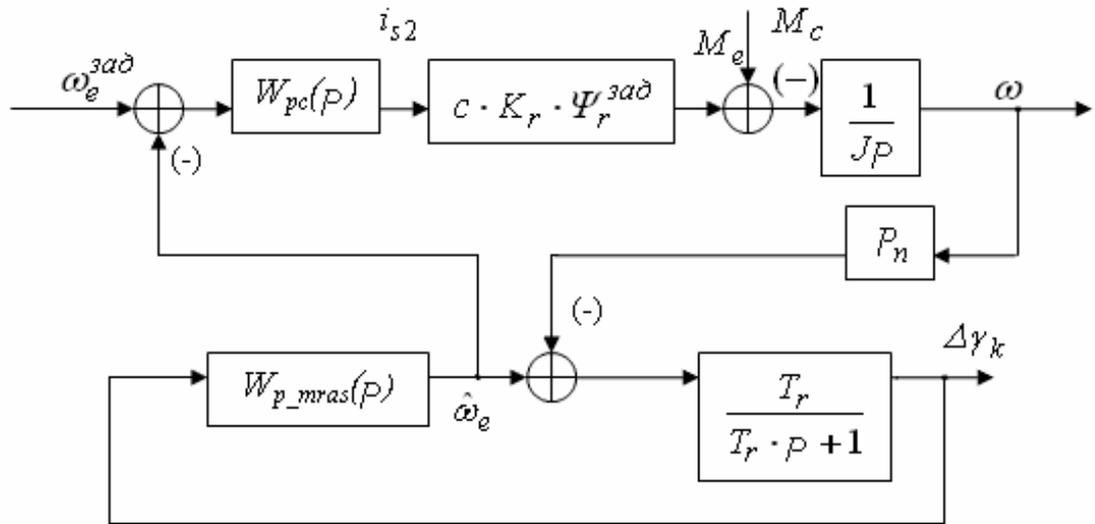


Рис. 3. Структурная схема системы управления и идентификации скорости

По данной методике синтеза, передаточная функция регулятора скорости будет иметь следующий вид

$$W_{pc}(p) = \tau \cdot \frac{Rf_{mn}}{Rf_{\omega n}} \cdot \left(\omega_c + \frac{\omega_c^2}{a_c \cdot p} \right),$$

где a_c – стандартный коэффициент, определяющий степень демпфирования переходных процессов; τ – параметр электропривода, характеризующий быстродействие в переходных процессах «в большом»; Rf_{mn} – задающее воздействие по моменту электропривода, соответствующее номинальному значению M_e ; $Rf_{\omega n}$ – задающее воздействие по скорости электропривода, соответствующее номинальному значению этой величины; ω_c – частота среза ЛАЧХ разомкнутого контура скорости, определяющая его быстродействие «в малом».

Методика отличается от традиционной тем, что вместо понятия малой некомпенсированной постоянной времени оперирует частотой среза ЛАЧХ контура скорости в разомкнутом состоянии, которая при фиксированном коэффициенте a_c однозначно определяет основные показатели системы в переходных процессах по возмущению – максимальное динамическое отклонение скорости, коэффициент неравномерности вращения и интегральную ошибку регулирования.

Также в данной главе рассмотрена методика структурного и параметрического синтеза двухэтапного идентификатора активного сопротивления статора асинхронного двигателя. В основу синтеза «быстрого» алгоритма, используемого при предварительном намагничивании АД, положены метод адаптивной модели и метод больших коэффициентов, где, в том числе, используется метод разделения движений, ориентированный на преднамеренную организацию разнотемповых процессов идентификации посредством малого параметра μ . Структурная схема «быстрого» идентификатора активного сопротивления обмотки статора двигателя представлена на рис. 4.

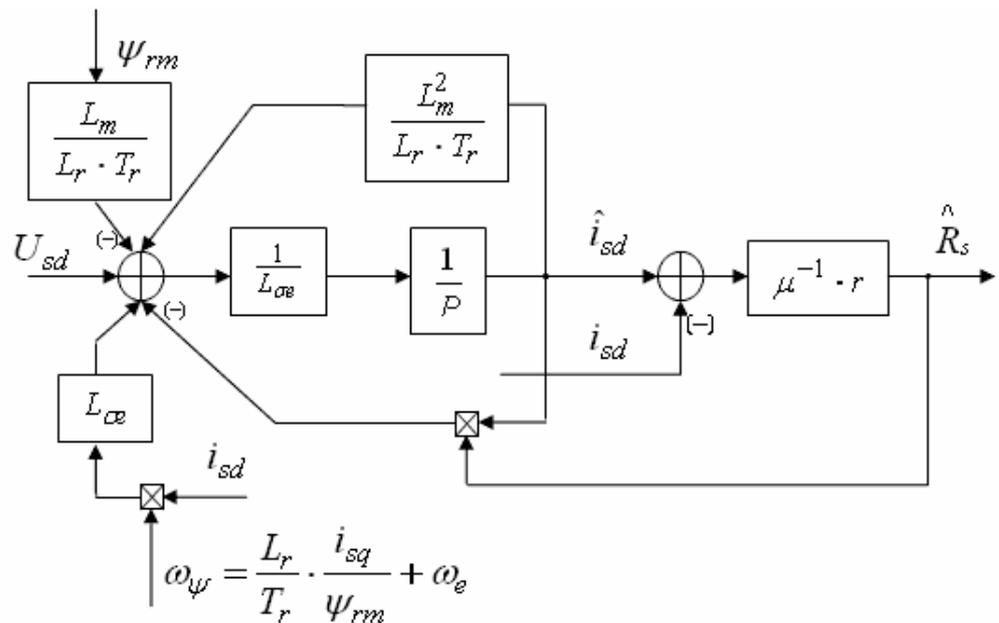


Рис. 4. Структурная схема идентификатора активного сопротивления статора

Построение «медленного» алгоритма текущей идентификации активного сопротивления статора, используемого для вычисления оценки активного сопротивления статора в рабочих режимах ЭП, основано на известной структуре, изображенной на рис. 5.

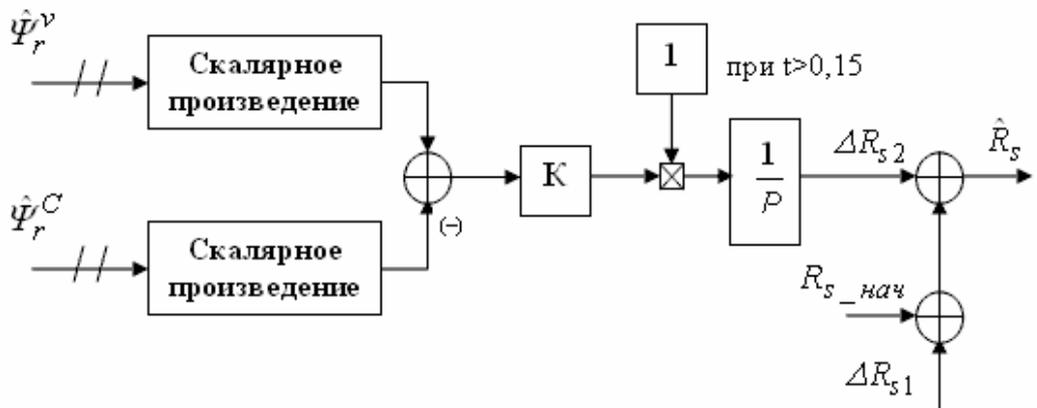


Рис. 5. Структурная схема «медленного» идентификатора активного сопротивления обмотки статора

Разработанные алгоритмы идентификации активного сопротивления статора, потокосцеплений и частоты вращения ротора в двигательном режиме работы ЭП обеспечивают следующие показатели.

- Идентификация неизмеряемых величин осуществляется точностью не хуже 1%.
- Величина оценки сопротивления устанавливается с погрешностью $\Delta R_s = 0,17\%$.
- Система ЭП адаптируется к изменениям параметров схемы замещения АД (на примере активного сопротивления обмотки статора).

- «Быстрый» алгоритм идентификации активного сопротивления обмотки статора на 2...3 порядка быстрее устанавливает истинное значение R_s , чем «медленный».

В генераторном режиме ЭП диапазоны изменений частоты вращения и момента нагрузки двигателя ограничены в зависимости от отклонений величины активного сопротивления статора. При достоверной исходной информации о величине R_s , что достигается предварительной и текущей ее идентификацией, диапазоны частоты вращения ротора и момента нагрузки остаются такими же, как и в двигательном режиме работы.

В пятой главе диссертации приведены описание экспериментального стенда, построенного на базе ПЧ «ЭРАТОН-М5» и результаты исследования адаптивных алгоритмов управления бездатчикового асинхронного ЭП.

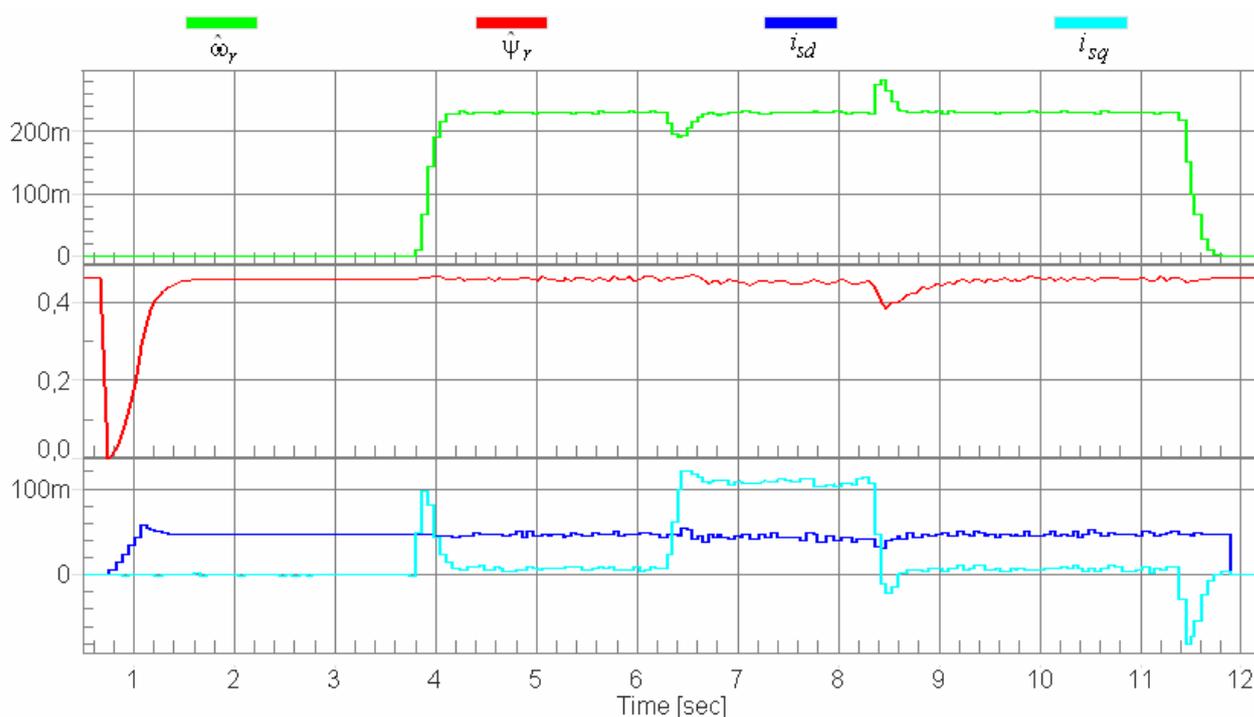


Рис. 6. Графики переходных процессов по оценкам частоты вращения и модуля потокосцепления ротора АД ($\hat{\omega}_r$ и $\hat{\psi}_r$), продольной и поперечной составляющим тока статора АД (i_{sd} и i_{sq}) при действии на ЭП номинальной нагрузки

На рис. 6 в качестве примера представлены переходные процессы при предварительном намагничивании и последующем пуске асинхронного двигателя на номинальную частоту вращения ротора, набросе и сбросе номинальной двигательной нагрузки и торможении.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и даны рекомендации по их применению.

В приложениях представлены справочные данные модельных АД; синтез системы векторного управления скоростью электропривода с датчиком частоты вращения (или положения ротора); параметры и структурные схемы модели бездатчиковой системы управления скоростью электропривода; результаты моделирования системы управления электроприводом; акты внедрения и использования результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования позволили получить следующие результаты.

1. Получены оценки влияния продолжительности алгоритмов активной предварительной идентификации параметров схемы замещения АД на относительную погрешность вычисления оценки соответствующих величин. Предложен алгоритм предварительной идентификации постоянной времени ротора АД с использованием в качестве тестового воздействия гармонического напряжения.

2. Предложена методика анализа корректности постановки задач текущей идентификации неизмеряемых координат и изменяющихся параметров АД в системах частотно-регулируемого ЭП по основным рабочим гармоникам электрических переменных. Методика позволяет получить условия, при выполнении которых искомые величины могут быть определены однозначно. Выявлены режимы работы ЭП, в которых однозначное вычисление требуемых величин в процессе их текущей идентификации невозможно.

3. Предложена методика совместного структурно-параметрического синтеза регулятора и идентификатора частоты вращения ротора бездатчикового асинхронного электропривода. В основу методики положены результаты анализа процессов, протекающих в моделях двигателя и адаптивной системы с эталонной моделью, представленных в разных вращающихся системах координат. Сформулированы результаты анализа устойчивости системы управления частотой вращения асинхронного двигателя с учетом возможных ошибок ориентирования управляющих воздействий по вектору потокосцеплений ротора.

4. Синтезирован «медленно» адаптивный к изменениям активного сопротивления статора идентификатор частоты вращения и вектора потокосцеплений ротора асинхронного двигателя структуры АСЭМ, а также разработана методика параметрического синтеза адаптора и корректора нулей.

5. Синтезирован «быстрый» алгоритм текущей идентификации активного сопротивления обмотки статора, применяемый лишь при предварительном намагничивании машины. Начальные условия по оценке активного сопротивления статора для поочередного использования «быстрого» и «медленного» алгоритмов формируются в процессе его активной текущей идентификации.

6. Исследованы границы устойчивости разработанных алгоритмов адаптации системы ЭП к изменениям активного сопротивления статора, результаты приведены в виде областей устойчивости в длительных двигательном и генераторном режимах работы для АД мощностью 37 кВт: диапазон регулирования частоты вращения ротора в двигательном режиме не менее 1:100, в генераторном – 1:8, при больших диапазонах адаптация системы должны временно «отключаться», а предыдущие оценки параметров – «замораживаться». При кратковременных генераторных режимах в этом случае достигнут диапазон регулирования не менее 1:100.

7. Корректность работы синтезированных алгоритмов бездатчикового векторного управления АД подтверждена на экспериментальном стенде. Идентификаторы обеспечивают указанный выше диапазон регулирования посредством адаптации к изменениям параметров АД.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Кучер Е. С., Панкратов В. В. Исследование условий текущей идентифицируемости координат и параметров асинхронного электропривода // Электричество. 2011. № 5. С. 48 – 52.

2. Кучер Е. С., Панкратов В. В. Активная предварительная идентификация постоянной времени ротора асинхронного двигателя // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. №1 (46). С. 127 – 134

3. Кучер Е. С., Панкратов В. В. Анализ условий идентифицируемости координат и параметров асинхронных электроприводов по основным гармоникам электрических величин // Электротехника. 2012. №9. С. 14 – 17.

4. Панкратов В. В., Зима Е. А., Котин Д. А., Кучер Е. С. Электроприводы с магнитоэлектрическими двигателями – перспективные системы для электрического и гибридного транспорта // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник ВИНТИ. 2010. № 8. С. 10 – 14.

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

Прочие опубликованные работы:

6. Кучер Е. С., Панкратов В. В. Условия идентифицируемости координат и параметров асинхронных электроприводов по основным гармоникам электрических величин // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14-й конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 63 – 66.

7. Кучер Е. С., Панкратов В. В. О корректности задач текущей идентификации координат и параметров асинхронного электропривода по основным гармоникам электрических величин // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы V Юбилейной международной науч.-техн. конф.; 12 – 14 октября 2011 г., Томский политехнический университет. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С. 191 – 195.

8. Панкратов В. В., Кучер Е. С. Методика совместного синтеза регулятора и идентификатора скорости «бездатчикового» асинхронного электропривода с векторным управлением e_r // Материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» ЭЭЭ-2009 (Новосибирск, 23 – 24 октября 2009 г.). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. С. 153 – 159.

9. Кучер Е. С. Анализ устойчивости систем управления скоростью асинхронного электропривода // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. Новосибирск, НГТУ, 2011. С. 32–39.

10. Кучер Е. С. Методика синтеза подсистем регулирования и идентификации скорости «бездатчикового» асинхронного электропривода с векторным управлением // Международной школе-конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и управление» ИТКСУ-2009. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. С. 58 – 59.

11. Кучер Е. С. Методика совместного синтеза регулятора и идентификатора скорости «бездатчикового» асинхронного электропривода с векторным управлением // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2009. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Часть 3. С. 258 – 260.

12. Кучер Е. С. Исследование устойчивости системы управления скоростью асинхронного электропривода // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2010. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 3. С. 193 – 194.

13. Панкратов В. В., Кучер Е. С. Анализ задач текущей идентификации координат и параметров асинхронного электропривода // Труды X Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2010. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. С. 24 – 27.

14. Тетюшева Е. С. Идентификация активного сопротивления статора «бездатчикового» асинхронного электропривода с векторным управлением // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2007. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. Часть 3. С. 88 – 89.

Подписано в печать « 29 » октября 2012 г. Формат 60x84x1/16
Бумага офсетная. Тираж 110 экз. Печ. л. 1.25.
Заказ № 1487

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