

На правах рукописи

Диаб Ахмед

ДИАБ АХМЕД АБДЕЛХАМИД ЗАКИ

**ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ
ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

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

Научные руководители

доктор технических наук, профессор

Панкратов Владимир Вячеславович

доктор технических наук, доцент

Аносов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Бубнов Алексей Владимирович

доктор технических наук, профессор, Омский государственный технический университет, заведующий кафедрой "Электрическая техника"

Ланграф Сергей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры электропривода и электрооборудования

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится « 29» января 2015 года в « 10⁰⁰ » часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru/>

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Область применения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД) постоянно расширяется в связи с увеличением числа возможных технических приложений, в которых требуется доступный и эффективный привод. Эти преимущества, однако, наталкиваются на сложность решения задач автоматического управления асинхронными двигателями в промышленных приводах с регулируемой частотой вращения. Это связано, прежде всего, со следующими причинами:

- асинхронный двигатель является сложным нелинейным динамическим объектом, содержащим в своей структуре перекрестные связи;
- некоторые переменные состояния, такие как токи и потокосцепления ротора, напрямую не могут быть измерены;
- изменения параметров схемы замещения асинхронного двигателя оказывают влияние на статические и динамические характеристики электромеханической системы, что делает необходимым учет их отклонений.

Неизбежные вариации параметров АД снижают эффективность управления электроприводом (ЭП). В настоящее время исследования в этой области, в основном, сосредоточены на методах бездатчикового и устойчивого к изменениям параметров управления скоростью асинхронного двигателя.

Развитие высоких технологий обуславливает непрерывное повышение требований к качеству работы современных систем автоматического управления электроприводами. Для эффективного решения задач управления требуется разработка новых алгоритмов и систем управления, которые должны быть достаточно просты по принципам организации и функционированию.

В настоящее время системы автоматического регулирования преимущественно синтезируются на основе подходов классической теории автоматического управления (ТАУ), в результате чего получаются традиционные пропорционально-интегральные (ПИ-) регуляторы. Факторами, обусловившими широкое использование ПИ-регуляторов в системах стабилизации различных объектов, стали простота их структуры и высокая надежность. Однако их недостатком является то, что при изменении рабочих точек из-за возмущений требуется перенастройка регуляторов. На предприятиях с непрерывным режимом работы при использовании таких регуляторов необходим постоянный контроль за ходом технологического процесса, что требует большой численности персонала. Кроме того, для процессов с переменными параметрами, запаздыванием, существенными нелинейностями и значительными помехами использование ПИ-регуляторов может оказаться неэффективным. Трудности, обусловленные настройкой ПИ-регуляторов, приводят к тому, что в большинстве случаев они работают не в оптимальном режиме.

Одним из современных формализованных подходов к анализу и синтезу систем управления, базирующихся на математических методах оптимизации, является технология управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей, которая все чаще стала вытеснять ПИ-регуляторы. Этот подход начал развиваться в начале 60-х годов для управления процессами и оборудованием в нефтехимическом и энергетическом производствах, для которых, в связи со сложностью математических моделей процессов, применение традиционных методов синтеза было затруднено.

Основным достоинством управления на основе прогнозирующих моделей (УПМ), определяющим его успешное использование при разработке и эксплуатации систем управления, служит относительная простота базовой схемы формирования обратной связи. Последнее обстоятельство позволяет управлять многомерными и многосвязными объектами со сложной структурой, включающей нелинейности, оптимизировать процессы в режиме реального времени в рамках ограничений на управляющее воздействие и координаты состояния, учитывать интервальные неопределенности в задании объектов и возмущений. Кроме того, возможен учет транспортного запаздывания и отказов датчиков измерительной системы, изменение критериев качества в ходе процесса управления.

Управление с прогнозирующей моделью успешно применяется в областях обработки изображений и регулирования, где надежность функционирования является одним из главных требований качества. Тем не менее, УПМ находится на начальной стадии применения в области автоматического управления асинхронными регулирующими электроприводами.

Технические системы работают в условиях постоянно изменяющихся климатических, нагрузочных и электромагнитных воздействий. В этих условиях возникает необходимость в постоянной подстройке параметров регуляторов. Следовательно, электроприводы таких систем нуждаются в наблюдателях для оценки текущих значений параметров двигателя, его скорости и регуляторах скорости/момента, потокосцепления ротора и токов для поддержания их на заданном уровне.

Значительный вклад в исследование структур и разработку алгоритмов векторного управления внесли зарубежные и отечественные ученые F. Blaabjerg, G. Hennenberger, J. Holtz, R. Jötten, H. Kubota, T.A. Lipo, R.D. Lorenz, T. Ohtani, C. Schauder, И.Я. Браславский, А.Б. Виноградов, В.М. Завьялов, А.М. Зюзев, Д.Б. Изосимов, В.В. Панкратов, Котин Д.А. и многие другие и в исследование структур и разработку алгоритмов УПМ-регулятора внесли Е.Ф. Самачо, А.Я. Коростелев, Ю.В. Митришкин, Е.И. Веремей и многие другие.

Объектом исследования в настоящей работе являются процессы управления скоростью, токами и потокосцеплениям АД.

Предмет исследования – УПМ-регуляторы в системах векторного управления асинхронного электропривода.

Целью работы является повышение качества процессов регулирования координат асинхронного электропривода на основе применения методов управления с прогнозирующими моделями в регуляторах скорости, потокосцепления и токов двигателя.

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

1. Разработать и исследовать алгоритмы векторного управления асинхронным электроприводом с УПМ-регуляторами:

- а) при косвенном векторном управлении АД;
- б) при векторном управлении с непосредственной ориентацией управляющих воздействий по опорному вектору потокосцеплений.

Для этого необходимо разработать методики синтеза регуляторов скорости, потокосцеплений ротора и токов АД на основе УПМ, провести сравнительное исследование эффективности традиционных пропорционально-интегральных и предложенных УПМ-регуляторов при векторном управлении электроприводом.

2. Применить УПМ-регуляторы в бездатчиковом асинхронном ЭП с векторным управлением и вычислением частоты вращения ротора на основе адаптивного наблюдателя полного порядка (НПП).

3. Экспериментально подтвердить работоспособность разработанных бездатчиковых алгоритмов векторного управления АД, для чего должны быть выполнены:

а) разработка специализированных алгоритмов и модульной структуры программного обеспечения для реализации пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и построения систем векторного управления АД с НПП на базе аппаратных средств отладочного комплекта TMDSHVMTRPFCKIT - Texas Instruments в среде Code Composer Studio v5 (CCStudio);

б) техническая реализация и экспериментальные исследования разработанной системы управления асинхронным приводом на базе ПЧ TMDSHVMTRPFCKIT - Texas Instruments мощностью 0,75 кВт.

Научная новизна работы.

На основе анализа, систематизации и обобщения научных достижений в таких областях как теория автоматизированного электропривода и теория автоматического управления сформирован новый инженерный подход к решению задачи проектирования систем автоматического управления процессом векторного управления (ВУ) АД на основе прогнозирующих моделей, который характеризуется следующими основными результатами.

1. Разработаны новые типовые структуры систем векторного управления АД на основе многомерного УПМ для скорости, потокосцеплений и токов двигателя с учетом ограничений на управляющие воздействия.

2. Разработана новая универсальная процедура синтеза УПМ-регуляторов для систем ВУ АД.

3. Подтверждена эффективность применения УПМ-регулятора скорости по сравнению с традиционным ПИ-регулятором в процессах отработки возмущений по нагрузке.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Выполнены теоретическая и практическая разработка алгоритмов и модульной структуры программного обеспечения для систем бездатчикового векторного управления АД с адаптивным НПП и УПМ.

2. Разработан НПП-наблюдатель скорости и потокосцепления ротора для ЭП с повышенной точностью регулирования на основе алгоритмов УПМ, обладающий приемлемой чувствительностью к вариациям сопротивления статора на низких частотах.

3. Реализован макет разработанной системы бездатчикового ВУ АД и подтверждена ее эффективность.

Разработанные структурные схемы и законы векторного управления частотой вращения АД, а также усовершенствованные алгоритмы оценки координат электропривода с УПМ проверены экспериментально и могут быть рекомендованы для расширенного использования проектировщиками электроприводов.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач используются положения теории электропривода, методы теории автоматического управления, теории векторного и адаптивного управления, теории управления с прогнозирующей моделью, аналитические методы расчета, основанные на применении аппарата дифференциальных уравнений и передаточных функций. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов осуществля-

ется методами цифрового моделирования в пакете программ Matlab 7.10.0 (R2010a) – Simulink 7.5 и натурального эксперимента с использованием среды разработки программ Code Composer Studio v5, компьютерных методов интерактивной отладки и исследования микропроцессорных систем управления.

Положения, выносимые на защиту.

1. Система управления с прогнозирующей моделью при действии возмущений типа скачка с учетом ограничений на управляющие воздействия.
2. Результаты исследования качества векторного управления скоростью асинхронного двигателя, согласно которым с помощью УПМ получена более высокая устойчивость системы регулирования к возмущениям по нагрузке по сравнению с ПИ-регулятором.
3. Результаты сравнительного исследования оценок скорости двигателя, согласно которым адаптивный НПП с компенсацией температурного дрейфа активного сопротивления статора повышает точность оценивания скорости и снижает чувствительность электропривода с УПМ к изменениям параметров даже на очень низких частотах вращения АД по сравнению с неадаптивным НПП.
4. Результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов управления асинхронными ЭП на базе комплекта TMDSHVMTRPFCKIT производства Texas Instruments.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно разработаны алгоритмы управления координатами электропривода с прогнозирующими моделями, выполнены подготовка и проведение вычислительных и натуральных экспериментов, реализован макет электропривода. Вклад в работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем и другими исследователями, заключается в постановке частных задач исследования, выполнении расчетов, разработке методик структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления, исследовании синтезированных алгоритмов методом численного моделирования, подготовке и проведении экспериментов, анализе полученных результатов.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных в диссертации исследований используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) при изучении студентами и магистрантами специальных дисциплин.

Степень достоверности.

Достоверность изложенных в диссертации результатов и выводов подтверждается цифровым моделированием в пакете программ Matlab – Simulink и результатами натурального эксперимента с использованием среды разработки программ Code Composer Studio v5, компьютерных методов интерактивной отладки и исследования микропроцессорных систем управления.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 8 Международных и Всероссийских конференциях: Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» ЭПЭ-2013, г. Томск, 2013 г.; XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2012, г. Новосибирск, 2012 г.; V Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (СМОТР-2012) г. Томск, 2012 г.; The 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012) г. Томск, 2012 г.; XIV Международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным уст-

ройдствам EDM-2013, Алтай, 2013 г.; XX Юбилейной международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» СТТ-2014, Томск, 2014 г.; VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (СМОТР-2014) г. Томск, 2014 г.; 15 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014), (Altai, Erlagol, 2014);

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, 12 научных работ в сборниках тезисов международных и всероссийских конференций; в том числе 8 статей в изданиях SCOPUS.

Объём и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, списка используемой литературы из 67 наименований и 4 приложений. Количество страниц основного текста 145, в том числе рисунков 65, таблиц 4.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

Первая глава диссертации посвящена подробному обсуждению различных аспектов векторного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Основное внимание уделено методам управления с использованием системы координат, ориентированной по потокосцеплению ротора. Приводится математическая модель АД, используемая при синтезе законов векторного управления в координатах состояния «токи статора – потокосцепления ротора». Рассмотрены методы построения наблюдателей в системах векторного управления. Приводится численный синтез регуляторов системы ЭП.

Вторая глава диссертации состоит из трех частей. В первой части главы представлен обзор современных УПМ-методов управления. Также рассмотрены особенности построения систем с УПМ: их основные свойства и отличительные признаки; модели, используемые при УПМ подходах; задачи, решаемые при синтезе УПМ-регуляторов.

Принцип УПМ можно охарактеризовать следующей последовательностью, которую иллюстрирует рисунок 1.:

1. Измеряется или оценивается вектор состояния x_k реального объекта:

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{A} \tilde{x}_k + \tilde{B} \tilde{u}_k + \tilde{H} d_k, \quad \tilde{y}_k = \tilde{C} \tilde{x}_k + w_k, \quad (1)$$

здесь $k = 0, 1, 2, \dots$ - номер такта, определяющий дискретный момент времени $t = k\Delta t$, где Δt - шаг дискретности.

2. Решается оптимизационная задача для прогнозирующей модели с начальным условием \tilde{x}_k по отношению к функционалу

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i, \quad i = k + j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad x_k = \tilde{x}_k, \quad y_i = Cx_i. \quad (2)$$

Здесь размерности векторов состояния, управления и измерения такие же, как и в системе (1).

Пусть прогнозирующая модель (2) на начальном такте $j = 0$ иницируется состоянием \tilde{x}_k реального объекта управления, достигнутого на k -м такте его функционирования. Кроме того, пусть выполняются равенства $\tilde{u}_i = u_i$ для любого $i = k, k + 1, \dots, k + P$.

3. Используется найденная оптимальная функция в качестве программного управления на отрезке. Качество управления с прогнозирующей моделью будем оценивать значениями квадратичного функционала (КФ)

$$J_k = J_k(\bar{y}, \Delta\bar{u}) = \sum_{j=1}^P \left[(y_{k+j} - r_{k+j})^T R_{k+j} (y_{k+j} - r_{k+j}) + \Delta u_{k+j-1}^T Q_{k+j} \Delta u_{k+j-1} \right], \quad (3)$$

где R_{k+j} и Q_{k+j} - заданные положительно определённые матрицы, векторы, представляющие регулируемые и управляющие последовательности соответственно на горизонте прогноза. Использование функционала (3), наряду с оптимизацией динамики, позволяет обеспечивать астатизм замкнутой системы.

Рассматривается оптимизационная задача

$$J_k = J_k(\bar{y}(\Delta\bar{u}), \Delta\bar{u}) = J_k(\Delta\bar{u}) \rightarrow \min_{\Delta\bar{u} \in E^{mP}} \quad (4)$$

о поиске программной последовательности векторов Δu_i , которая минимизирует функционал (3) с учётом ограничений.

Также потребуем, чтобы на любом шаге процесса выполнялись ограничения на управляющие и выходные переменные:

$$u_i^- \leq u_i \leq u_i^+, \quad \Delta u_i^- \leq \Delta u_i \leq \Delta u_i^+, \quad y_i^- \leq y_i \leq y_i^+ \quad (5)$$

где u_i^- , u_i^+ , Δu_i^- , Δu_i^+ и y_i^- , y_i^+ - заданные векторы.

Замечание: неравенства в приведенных формулах понимаются по каждой из компонент соответствующих векторов.

4. Замена момента времени k на момент $k + 1$ и повторение операций, указанных в пунктах 1 - 3. Алгоритм рассматриваемого УПМ- регулятора приведен на рисунке 2.

Общая формулировка задачи оптимального управления, представляющей собой задачу динамической оптимизации, сводится к минимизации целевой функции (ЦФ) с учетом дифференциальных и алгебраических ограничений.

Заметим, вопрос о минимизации интегрального КФ при наличии ограничений сводится к стандартной задаче численного анализа - к задаче выпуклого КФ. Для поиска точки экстремума, которая является либо внутренней, либо граничной точкой множества, могут быть привлечены известные численные методы. В диссертационной работе используется метод барьерной функции, не требующий большого объема памяти

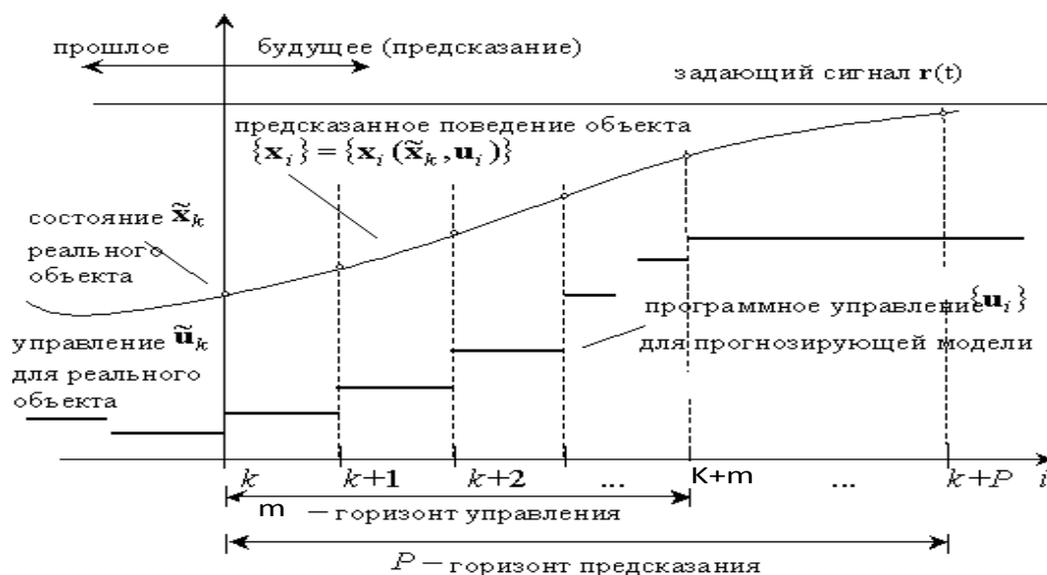


Рисунок 1 – Принцип удаляющегося горизонта в УПМ

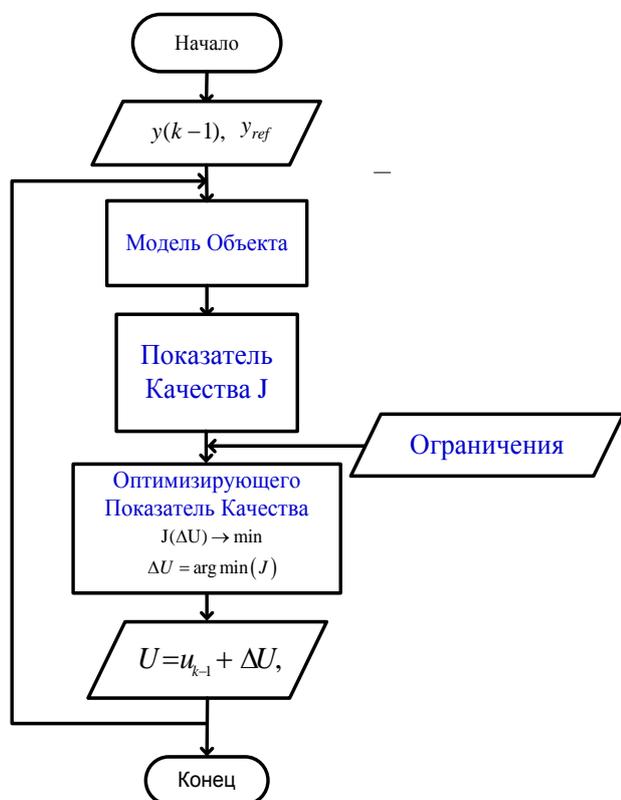


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма УПМ-регулирования

Во второй части второй главы диссертации исследована система векторного управления скоростью АД с использованием УПМ-регулятора. Методом цифрового моделирования выполнено сравнение качества регулирования с помощью ПИ- и УПМ-регуляторов скорости. Установлена более высокая динамическая эффективность предлагаемого УПМ-регулятора по сравнению с классическим ПИ-регулятором.

Имитационное моделирование системы векторного управления выполнялось в программе Matlab/Simulink для функциональной схемы системы ЭП, изображенной на рисунке 3.

УПМ-регулятор имеет два входных сигнала: сигнал задания и сигнал обратной связи по моменту нагрузки или частоте вращения выходного вала АД (рисунок 4).

В данной работе для синтеза регуляторов использовались линеаризованные модели

АД. Линеаризованная модель, дискретизованная с периодом 5 мс, имеет достаточно высокий порядок, что может привести к повышенным затратам вычислительных ресурсов при управлении. Поэтому ее порядок снижен путем применения упрощенной модели механической части электропривода.

При векторном управлении моментом операторное уравнение двигателя может быть записано как

$$\omega_r(p) = \frac{1}{Jp} (M_e(p) - M_L(p)), \quad (6)$$

здесь J - приведенный к валу момент инерции ЭП; M_e - электромагнитный момент АД; M_L - приведенный к валу момент сопротивления. Для построения прогноза используется модель объекта

$$\dot{\omega}_r = -\frac{d}{J}\omega_r + \begin{bmatrix} K_T & -1 \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ M_L \end{bmatrix}, y = \omega_r \quad (7)$$

где $K_T = 3npL_m^2 i_{ds} / 4L_r$ - коэффициент передачи между M_e и током i_{qs} ; d - коэффициент демпфирования.

Ограничения можно представить в виде:

$$-i_{qs-n} \leq i_{qs} \leq i_{qs-n}, -\omega_{r-n} \leq \omega_r \leq \omega_{r-n} \quad (8)$$

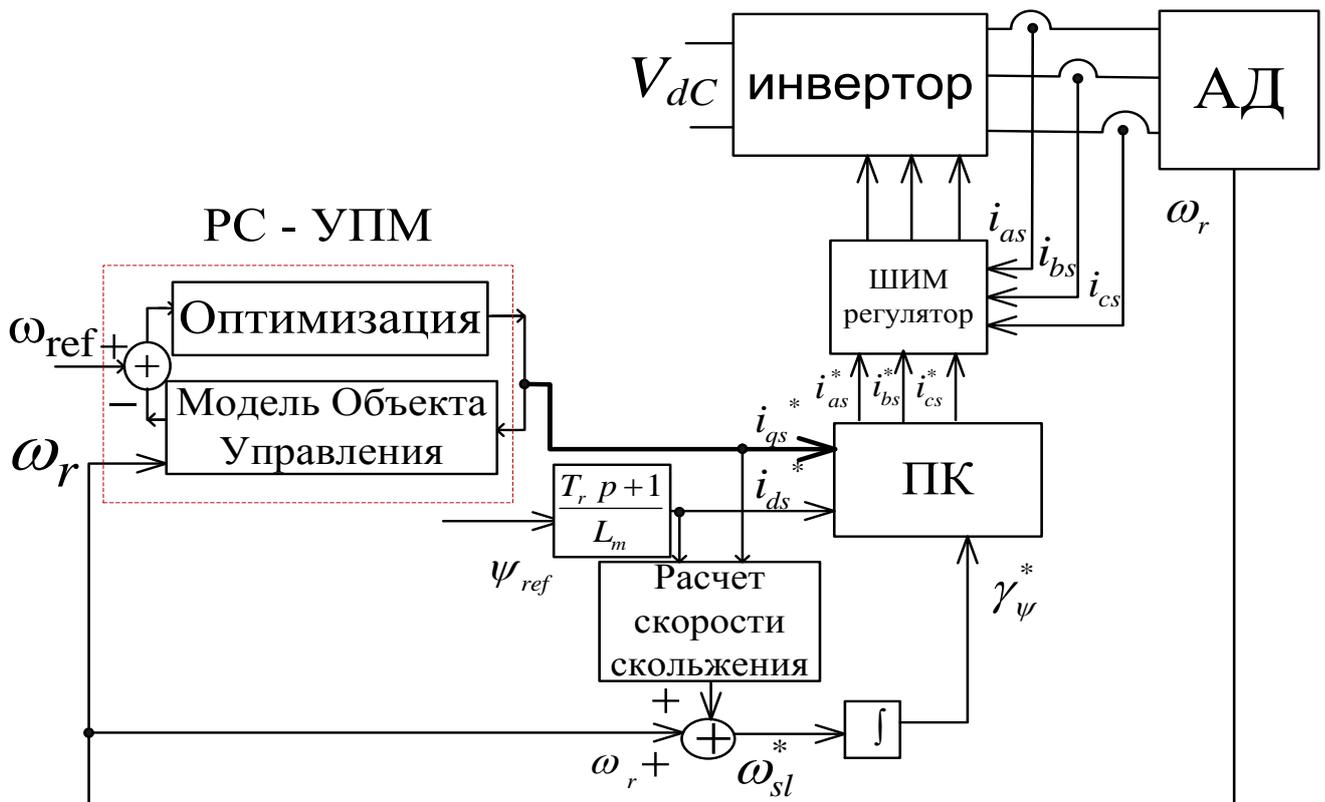


Рисунок 3 – Функциональная схема системы векторного управления АД

Для удобства представления, упрощенная линеаризованная модель АД, описанная данной формулой, используется в составе регулятора.

Отклик УПМ-регулятора по сравнению с ПИ-регулятором при постоянном задающем воздействии показан на рисунке 5 и при гармоническом задающем воздействии показан на рисунке 6. На основании проверки результатов моделирования сделаны следующие выводы:

- УПМ-регулятор является более устойчивым к изменениям параметров двигателя, чем ПИ-регулятор, в условиях возмущений по нагрузке.
- Эффективность УПМ-регулятора по быстрдействию при отработке возмущающих воздействий в 40 раз превосходит быстрдействие классического ПИ-регулятора, при тех же условиях. Динамическая просадка скорости в 4 раза меньше при использовании УПМ алгоритма построения регулятора скорости.

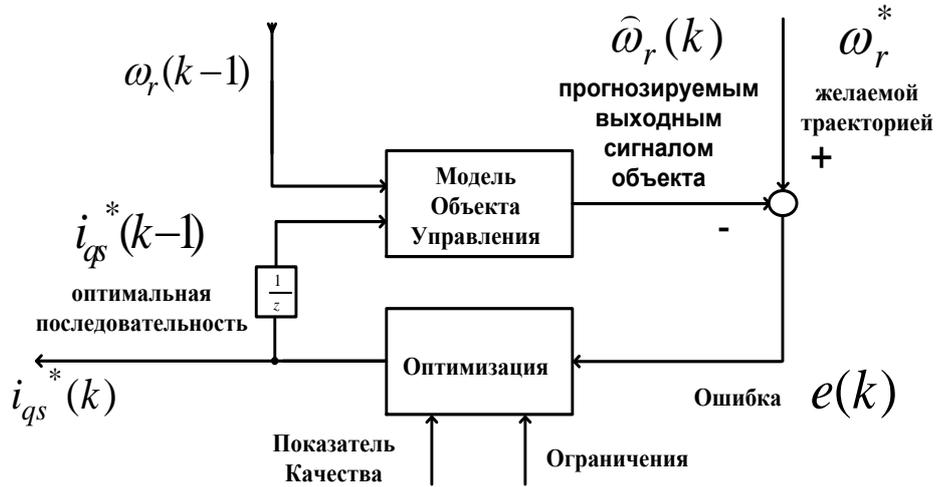


Рисунок 4 – Базовая структура УПМ-регулятора

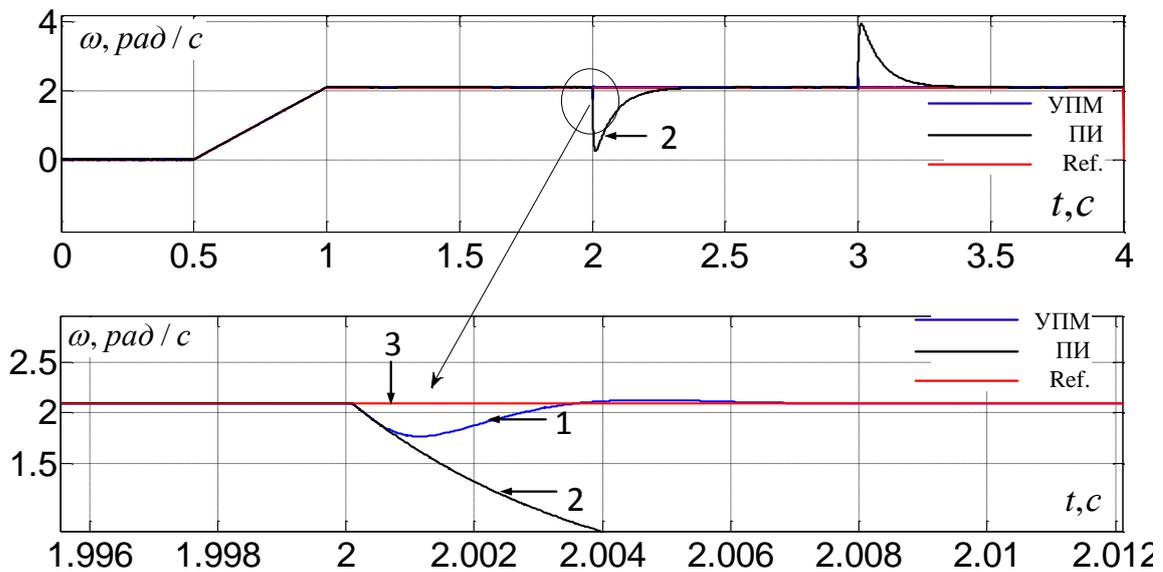


Рисунок 5 – Отклик УПМ-регулятора по сравнению с ПИ-регулятором при постоянном задающем воздействии и скачкообразном приложении сигнального возмущения: 1 – УПМ-регулятор; 2 – ПИ-регулятор; 3 – задающее воздействие на частоту вращения

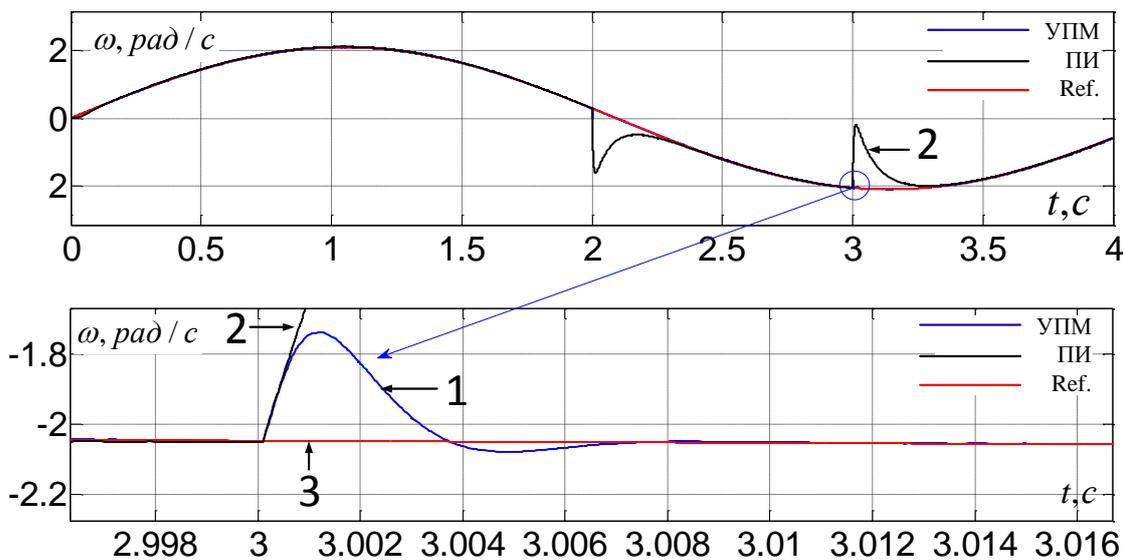


Рисунок 6 – Реакция УПМ-регулятора по сравнению с ПИ-регулятором при гармоническом задающем воздействии и скачкообразном приложении сигнального возмущения: 1 – УПМ-регулятор; 2 – ПИ-регулятор; 3 – задающее воздействие на частоту вращения

Расчет динамических характеристик системы векторного управления АД выполнен методом цифрового моделирования в программе «MATLAB-Simulink».

Графики переходных процессов в системе с использованием УПМ-регуляторов показаны на рисунке 8 при работе на номинальной частоте вращения с номинальной двигательной нагрузкой.

Результаты получены для следующего режима работы: пуск на холостом ходу – наброс нагрузки – сброс нагрузки. Результаты моделирования показали, динамика переходных процессов по токам двигателя, потокосцеплению и частоте вращения ротора подтверждает эффективность УПМ закона управления по сравнению с ПИ-регуляторами. Применение УПМ алгоритма в системе непосредственного полеориентирования позволяет повышать быстродействия по управляющему воздействию до 10 раз и в 11 раз по возмущающему воздействию, при тех же условиях.

Синтезированная система обеспечивает высокие динамические характеристики, плавность хода и глубокий диапазон регулирования скорости и крутящего момента. Использование в электроприводах отрицательной обратной связи по скорости и УПМ-регуляторов позволяет достигать высокой точности стабилизации заданных скорости и момента, быстрое реагирование на внешние возмущающие воздействия при требуемом качестве переходного процесса.

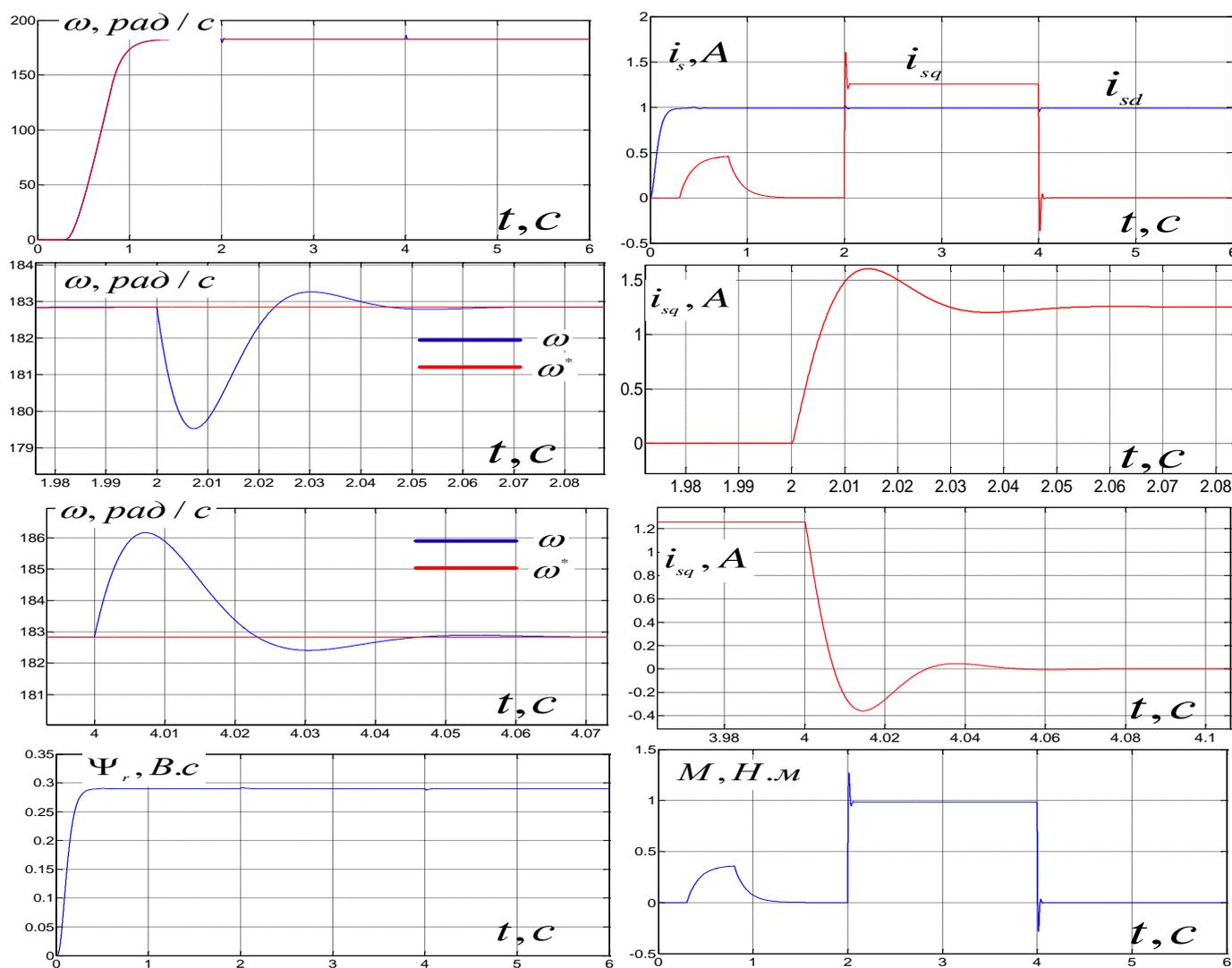


Рисунок 8 – Графики переходных процессов в системе с УПМ-регуляторами при работе на номинальной частоте вращения с номинальной двигательной нагрузкой

Третья глава диссертации посвящена методике структурно-параметрического синтеза алгоритма бездатчикового векторного управления АД с УПМ. Для построения бездатчиковой СВУ АД использована структура с УПМ-регуляторами, полученная в предыдущей главе диссертационной работы. Методика синтеза алгоритмов идентификации неизмеряемых координат АД базируется на теории функций Ляпунова. Разработанный с ее помощью алгоритм идентификации частоты вращения ротора адаптивен к изменениям активного сопротивления статора АД, 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» (НПП).

Математическая модель объекта наблюдения – электромагнитных процессов АД – представлена в неподвижной декартовой системе координат. Структура НПП позволяет совместно с вычислением частоты вращения 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:

$$\hat{\omega}_r = \left(k_{ps} + \frac{k_{is}}{s} \right) \left\{ \hat{\lambda}_{\alpha r} (i_{\beta s} - \hat{i}_{\beta s}) - \hat{\lambda}_{\beta r} (i_{\alpha s} - \hat{i}_{\alpha s}) \right\},$$

а оценка сопротивления статора \hat{R}_s может быть вычислена как

$$\hat{R}_s = R_{s0} + \left(\frac{k_{ir}}{s} \right) \left\{ \hat{i}_{\alpha s} (\hat{i}_{\alpha s} - i_{\alpha s}) - \hat{i}_{\beta s} (\hat{i}_{\beta s} - i_{\beta s}) \right\},$$

здесь k_{ps} , k_{is} – коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной частей регулятора – формирователя оценки электрической частоты вращения; R_{s0} – начальное

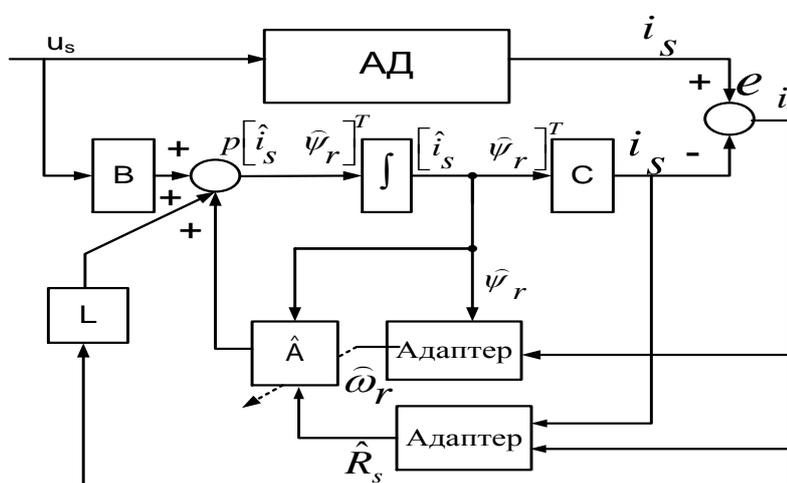


Рисунок 9 – Структурная схема адаптивного НПП

приближение оценки активного сопротивления статора; k_{ir} – коэффициент передачи интегрального регулятора оценки активного сопротивления статора АД. Структурная схема адаптивного НПП приведена на рисунке 9.

Структурная схема системы бездатчикового векторного управления ЭП с АД приведена на рисунке 10, где УПМ-управление используется для РС, РТ, РП. Для оценки

Графики переходных процессов в системе с использованием УПМ-регуляторов показаны на рисунке 11. Переходные процессы при работе ЭП на частоте вращения $0.05 * \omega_{\text{НОМ}}$ и отклонении активного сопротивления статора на 20% в большую и меньшую сторону представлены на рисунке 12. Как видно из представленных результатов цифрового моделирования, разработанный алгоритм бездатчикового управления не снижает достоинств УПМ алгоритма. Показатели качества системы регулирования: а) статическая точность регулирования частоты вращения не ниже 0.001 от номинальной скорости; б) диапазон регулирования скорости – 1:200; в) реакция на внешнее возмущающее воздействие, не дольше 50 мс.

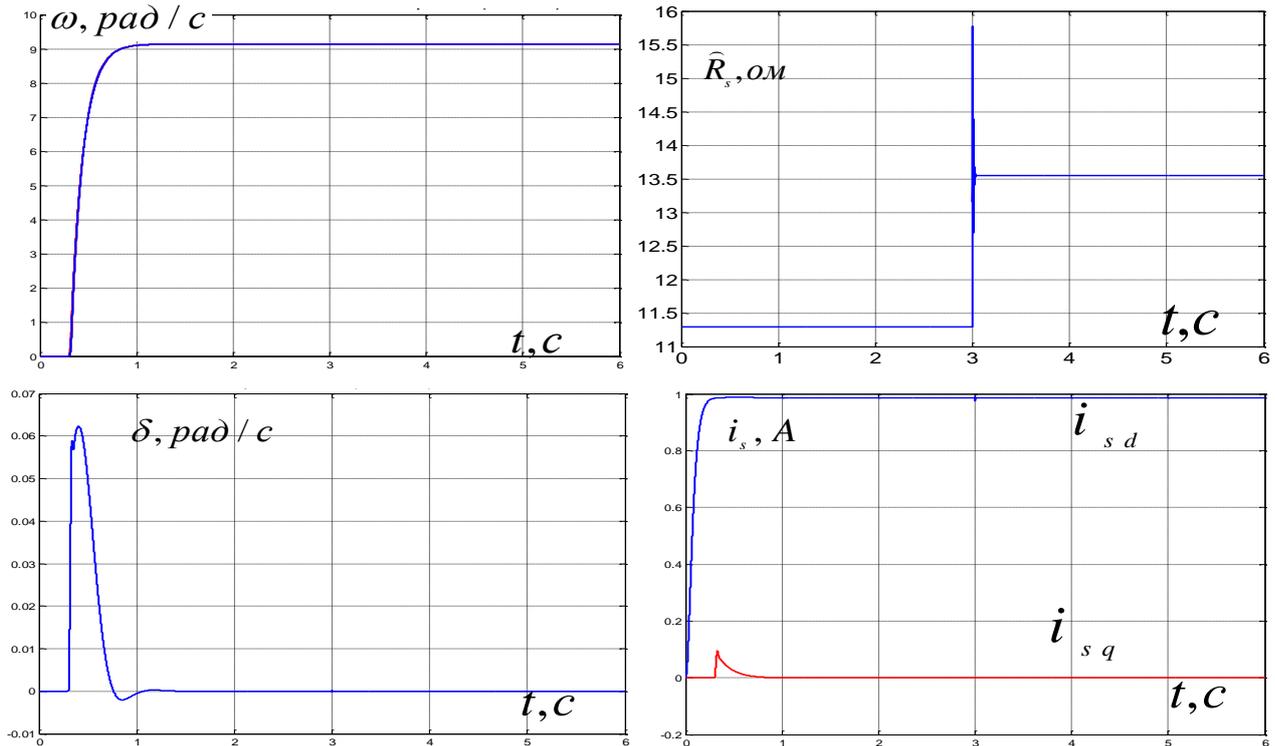


Рисунок 12 – Графики переходных процессов в системе с УПМ-регуляторами при работе на частоте вращения 0,05 от номинальной на холостом ходу с адаптацией к R_s

Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям разработанных алгоритмов управления асинхронным ЭП на лабораторном стенде. Для исследования предложенных алгоритмов разработан экспериментальный стенд, внешний вид которого представленный на рисунке 13. Асинхронный двигатель типа 5K33GN2A компании General Electric ($I_n = 1.3, A$; $U_n = 220, B$; $n = 1750, \text{об/мин}$; $P_n = 180, Bт$; $M_n = 1, H \cdot м$) питание, которого осуществляется от преобразователя частоты TMDSHVMTRPFCKIT (High Voltage Motor Control and PFC Developers Kit) – это отладочный набор компании Texas Instruments (750 Вт).

Система управления электроприводом реализована на микроконтроллере TMS320F28035 из Texas Instruments с тактовой частотой 60 МГц, вычисляющем моменты времени, в которых угловая скорость равна нулю и формируется команда на реверс электромагнитного момента двигателя, в виде сигнала напряжения, подводимого к соответствующему входу частотного преобразователя.

На рисунке 14. представлены временные диаграммы процессов по скорости и моментобразующему току двигателя, полученные на экспериментальной установке при разгоне электропривода со скорости 0,005 о.е. на скорость 0,01 о.е. Кроме того, на рисунке 15 представлена форма фазного тока двигателя на скорости 0,005 о.е.

Для доказательства эффективности разработанных алгоритмов управления электропривода были экспериментально исследованы его переходные характеристики в различных режимах работы. На рисунке 16. показаны переходные процессы системы электропривода по частоте вращения, моментобразующему току и току фазы А двигателя при разгоне со скорости 0,1 до 0,3 о.е., которые доказывают преимущества предлагаемых в работе алгоритмов.



Рисунок 13 – Внешний вид экспериментального стенда

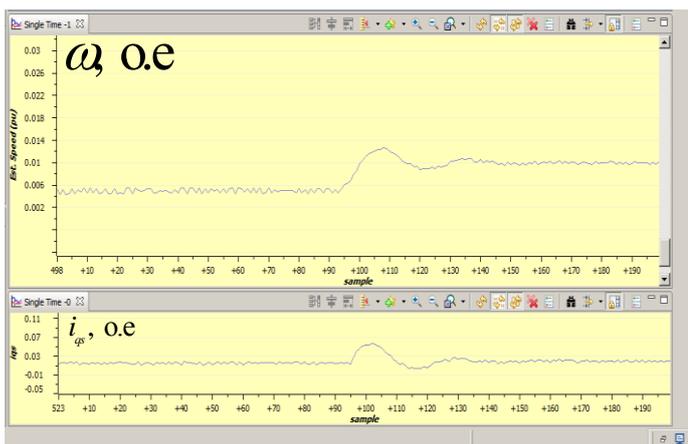


Рисунок 14 – Графики переходных процессов по частоте вращения и моментобразующему току двигателя при разгоне привода со скорости 0,005 о.е. на частоту вращения 0,01 о.е.

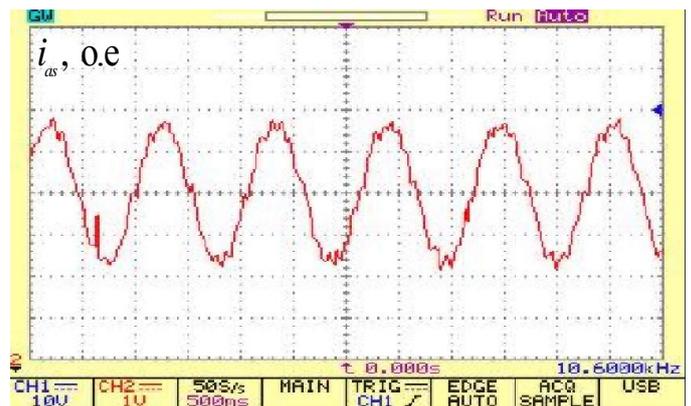


Рисунок 15 – Форма фазного тока двигателя на скорости 0,005 о.е.

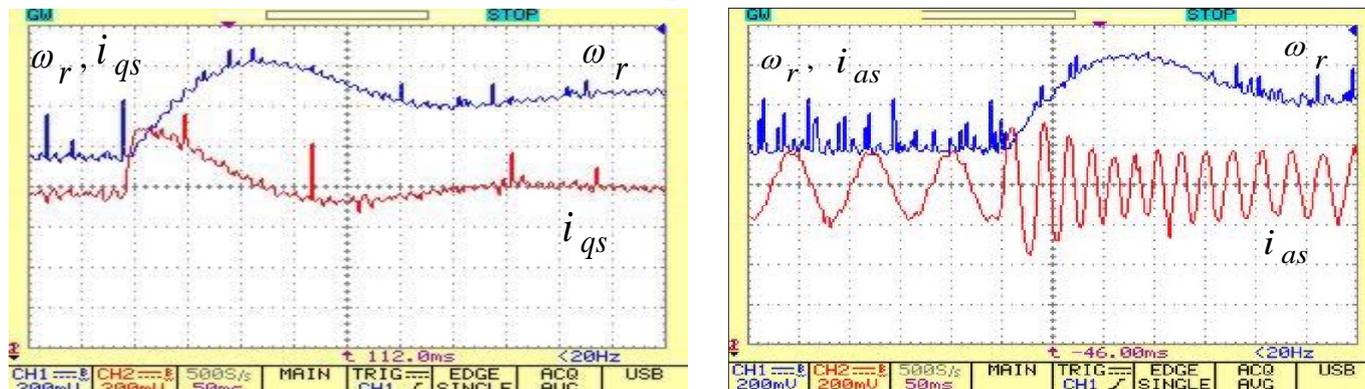


Рисунок 16 – Переходные характеристики электропривода по частоте вращения и моментобразующему току и току фазы А двигателя при разгоне со скорости 0,1 до 0,3 о.е.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены следующие результаты проведенного исследования прогнозирующих моделей, предназначенных для выполнения функций регуляторов в системах векторного управления асинхронными двигателями.

1. Доказана эффективность применения УПМ-регуляторов в системах косвенного векторного управления АД – в качестве регулятора скорости, а в системах векторного управления АД с непосредственным полеориентированием – в качестве регуляторов скорости, токов и регулятора потокосцепления.

2. Проведен синтез прогнозирующих алгоритмов управления координатами состояния асинхронного ЭП с обратными связями, в результате, которого получен нелинейный закон управления, на каждом шаге решающий задачу оптимизации траекторий выходных сигналов объекта в условиях ограничений на управляющие воздействия. Для синтеза УПМ-регуляторов используются предложенные упрощенные модели процессов.

3. В результате сравнительного анализа эффективности использование УПМ-регулятора скорости и традиционного ПИ-регулятора, при отработке возмущения по нагрузке на низких частотах вращения, показано, что:

- а) быстродействие УПМ алгоритма при отработке возмущающих воздействий в 40 раз выше, а динамическая просадка скорости в 4 раза меньше для системы косвенного полеориентирования при одних и тех же условиях;
- б) применение УПМ алгоритма в системе непосредственного полеориентирования позволяет повышать быстродействия в 10 раз по управляющему воздействию и в 11 раз - по возмущающему воздействиям, при тех же условиях.

4. Разработан и исследован алгоритм вычисления частоты вращения ротора АД в системах бездатчикового векторного управления с УПМ-регуляторами. При этом проблема нечувствительности к изменениям активного сопротивления статора решается путём использование адаптивного наблюдателя полного порядка.

5. Работоспособность разработанных алгоритмов подтверждена экспериментально на лабораторном стенде, где реализована система бездатчикового управления АД с использованием контроллера TMDSHVMTRPFCKIT - Texas Instruments. Полученные на стенде характеристики полностью соответствуют расчетным.

6. За счет использования Code Composer Studio (CCStudio-v5) разработана библиотека стандартных программных модулей для систем векторного управления, кото-

рая предлагается для реализации различных структур систем управления с разными типами электрических машин переменного тока. Комплекс программно-аппаратных средств рекомендован в качестве основы при серийном производстве преобразователей частоты на базе TMDSHVMTRPFCKIT.

Значение результатов исследования состоит в разработке алгоритмов и программ для систем векторного управления АД, формулировке рекомендаций для проектировщиков электроприводов. В конечном итоге, результаты проведенных исследований при внедрении в практику должны дать повышение качества процессов регулирования электроприводов. Последнее, в свою очередь, повышает надежность работы электроприводов и приводит к экономии электроэнергии и ресурсов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов

1. Диаб, Ахмед А.З. Оценка скорости асинхронного двигателя в системах адаптивного управления по эталонной модели и с нейронной сетью / Диаб Ахмед А.З., Али С.А.А., Андреев Н.К. // Энергетика Татарстана, 2012, №2 – 26. С. 57 – 61.
2. Диаб А.А.З. Синтез идентификатора координат для бездатчикового асинхронного электропривода / В.В. Вдовин, А.А.З. Диаб, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. №1 (54). С. 5 – 17.
3. Диаб, А.А.З. Непосредственное векторное управление асинхронными электроприводами с использованием прогнозирующих моделей [Электронный ресурс] / А.А.З. Диаб, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // Инженерный вестник Дона, 2014, №1. <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2247>.

Прочие публикации

4. Diab, Ahmed A. Z., Real-Time Implementation of Full-Order Observer for Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Drive/Ahmed A. Z. Diab// Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Springer US, December 2014, Volume 25, Issue 6. –pp 639-648. , DOI: [10.1007/s40313-014-0149-z](https://doi.org/10.1007/s40313-014-0149-z).
5. Diab, A.A.Z. Speed Control of Sensorless Induction Motor Drive Based on Model Predictive Control./Diab A.A.Z., Denis A. Kotin, V. V. Pankratov// Proceedings of 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013). – Erlagol, Altai, July 1 – 5, 2013. – pp. 269 – 274.
6. Diab, A.A. Z. Model Predictive Control of Vector controlled Induction Motor Drive./ Diab A.A.Z, V.V. Pankratov// The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012, IEEE-Conference. – Tomsk, September 17–21, 2012, V II. – pp. 21 – 26.
7. Diab, A.A.Z. Vector controlled Induction Motor Drive based on Model Predictive Control./ Diab A.A.Z., V.V. Pankratov// 11th Inter. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), IEEE-Conf. – 30057 PROCEEDINGS, APEIE – 2012, In 7 Volumes, Volume 1. – Novosibirsk: NSTU, October 2 – 4. – pp. 167 – 173.
8. Diab, A.A.Z. Sliding Mode Control of Vector Controlled Induction Motor Drive / Diab A.A.Z., V.V. Pankratov//11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), IEEE- Conference. – 30057 PROCEEDINGS, APEIE – 2012, In 7 Volumes, Vol. 1. – Novosibirsk, October 2 – 4, 2012, pp. 175 – 182.

9. Diab, Ahmed A. Z., Implementation of Full Order Observer for Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Drive./ Diab A.A.Z., V.N Anosov// Proceedings of 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014), IEEE-Conference. – Erlagol, Altai, June 30-July 4, 2014. – pp. 347 – 352.
10. Диаб, А.А.З. Управление скоростью асинхронного электропривода на основе прогнозирующих моделей / А.А.З. Диаб// Электромеханические преобразователи энергии: материалы 6 междунар. науч.-техн. конф., Томск, 9–11 окт. 2013 г. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 219 – 223.
11. Diab, A.A.Z. Performance of Vector Controlled Induction Machine Drives as Influenced by Parameters Variations/ A.A.Z. Diab// Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов V Всеросс. научно-практической конф. – Том 2. – 25-27 апреля 2012 г.– Томск: Изд-во ТПУ. – С. 323–329.
12. Диаб А.А.З. Бездатчиковое Векторное Управление Асинхронным Электроприводом С Помощью Преобразователя Компании Texas Instruments,/ А.А.З. Диаб// Современные техника и технологии: сборник трудов XX Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т.1. ТПУ. – Томск, 14–18 апреля 2014 г.: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 225 – 226.
13. Диаб, Ахмед А.З., Микроконтроллер TMDSHVMTRPFCKIT Texas Instruments с системой Управления Асинхронным Электроприводом,/ Диаб Ахмед А.З. // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции, Том 1. – Томск – 2014, 23-25 апреля 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 165 – 168.
14. Diab, A.A.Z. Cascade Model Predictive Vector Control of Induction Motor/ Diab A.A.Z., V.V. Vdovin, D.A. Kotin, V.N Anosov, V.V. Pankratov//12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), IEEE- Conference. – 30057 PROCEEDINGS, APEIE – 2014, Vol. 1. – Novosibirsk, October 2 – 4, 2014, pp. 669 – 674.
15. Диаб, Ахмед А.З. Аппаратная Реализация Системы Бездатчикового Векторного Управления Асинхронным Электроприводом/ Ахмед А.З. Диаб, В. В. Панкратов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (Саранск, 7 – 9 октября 2014 г.). – г. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарёва, 2014, Том 2. - С. 23 – 28.
16. Diab, A.A.Z. A Comparative Study of Speed Control Based on MPC and PI-Controller for Indirect Field Oriented Control of Induction Motor Drive./ Diab A.A.Z., D.A. Kotin, V.N Anosov, V.V. Pankratov//12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), IEEE- Conference. – 30057 PROCEEDINGS, APEIE – 2014, Vol. 1. – Novosibirsk, October 2 – 4, 2014, pp. 728 – 732.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 115 экз.
Заказ 1323. Подписано в печать 14.11.2014 г.