

На правах рукописи

Ланграф Сергей Владимирович

**АСИНХРОННЫЙ МОМЕНТНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ИМИТАЦИИ УСИЛИЙ
ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические
комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования
Томского политехнического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Бекишев Р.Ф.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Обрусник В.П.

кандидат технических наук,
доцент Орлов Ю.А.

Ведущее предприятие: Научно-производственное объединение
«Сибирский машиностроитель», г.Томск

Защита состоится 30 мая 2007 года в 15 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в 217 ауд. 8-го учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г.Томск, ул. Белинского, 55

Автореферат разослан «28» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время системы электропривода (ЭП) прочно занимают лидирующее место среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надёжную работу механизмов во многих областях техники и жизнедеятельности человека. Функциональные возможности и эксплуатационные параметры современных ЭП во многом определяются характеристиками применяемых систем управления.

В качестве приводного двигателя в последнее время наибольшее распространение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Современный асинхронный ЭП реализован на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Его возможности позволяют организовать регулирование выходных координат ЭП в широком диапазоне, с высоким быстродействием и большой точностью. В создание и развитие теории систем ЭП переменного тока большой вклад внесли выдающиеся отечественные и зарубежные учёные – М.М. Ботвинник, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.М. Вейнгер, Д.А. Завалишин, Н.Ф. Ильинский, В.И. Ключев, М.П. Костенко, В.В. Рудаков, Ю.А. Сарбатов, О.В. Слежановский, И.М. Чиженко, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, И.И. Эпштейн, F. Blaschke, J. Holtz, W. Leonard, T.A. Lipo, D.W. Novotny и многие другие.

В настоящее время развитие систем асинхронного ЭП с микропроцессорным управлением позволяет путём создания новых программных алгоритмов синтезировать ЭП с широким набором эксплуатационных характеристик, что в свою очередь позволяет удовлетворить требования, накладываемые со стороны самых разных технологических объектов.

При эксплуатации любого трубопровода невозможно обойтись без элементов запорной арматуры (ЗА), предназначенных для управления потоками перемещаемой среды. К элементам ЗА относятся задвижки, заслонки, краны и вентили. Благодаря небольшому гидравлическому сопротивлению в открытом состоянии и высокой герметичности в закрытом, задвижки широко применяются на магистральных нефтепроводах. Необходимость организации дистанционного контроля и требования эксплуатации во взрывоопасной зоне обуславливают широкое применение асинхронного ЭП для управления ЗА.

Электропривод запорной арматуры (ЭПЗА) представляет собой сложный мехатронный модуль, объединяющий в своём составе систему управления, силовой преобразователь, асинхронный двигатель и редуктор. В качестве силового преобразователя может использоваться преобразователь частоты (ПЧ) или тиристорный регулятор напряжения (ТРН). Известны также конструкции ЭПЗА с прямым управлением от сети при помощи контактора. Система управления обеспечивает требуемые режимы эксплуатации ЗА, адекватную реакцию ЭП на изменение внешних условий, поддержку защитных функций и коммуникаций с другими устройствами.

Системы ЭПЗА широко применяются в технологических процессах при перекачке нефтепродуктов. Сбой и нарушение работы ЭПЗА может привести к тяжелым экологическим и экономическим последствиям. В случае превышения допустимого момента, ЭПЗА своим усилием может разрушить корпус задвижки. Если ЭПЗА не развивает требуемого момента, возможна ситуация с заклиниванием задвижки в закрытом состоянии, что также рассматривается как аварийная ситуация.

При серийном производстве систем ЭПЗА на этапе экспериментальной проверки показателей функционирования возникает задача проведения сложных нагрузочных испытаний. В данном режиме выполняется проверка ЭПЗА на соответствие требованиям по ограничению и формированию выходного момента. При этом испытательное нагрузочное устройство должно полностью имитировать диаграмму эксплуатационных усилий, прикладываемых со стороны элементов ЗА различных типов.

Для создания нагрузочного усилия самым простым решением является применение механического тормозного устройства в виде барабана и колодок. К основным недостаткам следует отнести сложность стабилизации тормозного момента, шум, повышенную вибрацию и т.д. Кроме того, опыт эксплуатации нагрузочного испытательного оборудования данной конструкции в ЗАО «ЭЛЕСИ», (г. Томск) показал, что точность результатов испытаний во многом определяется навыками и опытом оператора, который вручную управляет тормозным механизмом.

Нагрузочное усилие можно получить применением генераторов и двигателей постоянного тока с различными типами силовых преобразователей и систем управления. На фоне известных недостатков коллекторных машин постоянного тока с интересом рассматривается идея об использовании в качестве испытательного нагрузочного устройства асинхронного ЭП на базе ПЧ с векторным управлением.

Целью диссертационной работы является разработка системы управления нагрузочным асинхронным ЭП испытательного стенда для проверки ЭПЗА с возможностью имитации нагрузочных усилий со стороны элементов ЗА различных типов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать особенности режимов работы ЭПЗА и выделить требования к нагрузочному моментному ЭП испытательного стенда.
2. Разработать математическое описание и динамические имитационные модели компонентов нагрузочного асинхронного ЭП и элементов ЗА.
3. Разработать методику определения структуры и параметров для системы управления нагрузочным асинхронным ЭП испытательного стенда.
4. Реализовать микропроцессорное управление нагрузочным асинхронным ЭП испытательного стенда и провести экспериментальное исследование его работоспособности.

Перечисленные в диссертационной работе задачи решаются методами теории электрических машин, теории автоматического управления, численного моделирования и экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получено математическое описание нагрузочных усилий в элементах ЗА, отличающееся от известных ранее вариантов подробным рассмотрением воздействий прикладываемых со стороны компонентов ЗА к выходному звену ЭПЗА.

2. На основе классической системы векторного управления АД разработана система управления нагрузочным асинхронным ЭП с переменной структурой, позволяющая в составе испытательного стенда сформировать нагрузочный момент, имитирующий работу компонентов ЗА различных типов, что в свою очередь даёт возможность проведения качественной проверки ЭПЗА.

3. Предложена методика оптимальной настройки модифицированной системы векторного управления АД на основе использования системы относительных единиц и последовательного перехода от имитационной модели АД во вращающейся координатной системе к имитационной модели в стационарной системе координат, что систематизирует и существенно упрощает процесс синтеза структуры и параметров системы векторного управления нагрузочным асинхронным ЭП.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

1. В среде Matlab разработана имитационная модель процессов в элементах ЗА, что позволило провести анализ и формирование требований к ЭП нагрузочного стенда для испытаний ЭПЗА.

2. В сравнении с существующим способом ручного управления тормозным механизмом значительно повышена точность, информативность и эффективность проведения нагрузочных испытаний при проверке ЭПЗА.

3. Предложена инженерная методика синтеза регуляторов модифицированной системы векторного управления АД для применения в составе нагрузочного асинхронного ЭП испытательного стенда.

4. Разработано программное обеспечение для организации микроконтроллерного управления нагрузочным асинхронным ЭП испытательного стенда для проведения испытаний ЭПЗА.

Результаты работы использованы на предприятии ЗАО «ЭЛЕСИ», г.Томск при создании экспериментального образца нагрузочного испытательного стенда для проверки ЭПЗА в виде программного обеспечения для микроконтроллерной системы управления нагрузочным асинхронным ЭП. Методика оптимальной настройки системы векторного управления АД использовалась при создании экспериментальных установок в лаборатории МУНЦ «Данфосс» при ТПУ и в учебном процессе кафедры ЭПЭО ТПУ при изучении дисциплин «Электропривод переменного тока», «Системы управления электроприводов» и дипломном проектировании студентов.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель ЗА, на основе которой разработана методика формирования нагрузочного момента, позволяющая имитировать работу компонентов ЗА при проведении испытаний ЭПЗА.

2. Методика оптимальной настройки модифицированной системы векторного управления АД для работы в составе нагрузочного асинхронного ЭП испытательного стенда.

3. Организация микропроцессорной системы управления нагрузочным асинхронным ЭП испытательного стенда, реализующая функции управления в реальном масштабе времени.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках следующих мероприятий:

- на международной научно-технической конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», УГТУ-УПИ, г.Екатеринбург, 2003 г.
- на всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях», СибГИУ, г.Новокузнецк, 2004 г.
- на серии всероссийских научно-практических конференций «Современные средства и системы автоматизации», ТУСУР, г.Томск, 2003-2004 гг.
- на международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-2005, УГТУ-УПИ, г.Екатеринбург, 2005 г.
- на международной научно-технической конференций «Электромеханические преобразователи энергии», ТПУ, г.Томск 2005 г.
- на всероссийской научно-технической конференции с международным участием. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», ЭЭЭ-2005, НГТУ, г.Новосибирск, 2005 г.
- на межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии», АПТ-2005, НГТИ, г.Новоуральск, 2005 г.
- на всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и силовая электроника», АЭПЭ-2006, СибГИУ, г.Новокузнецк, 2006 г.
- на международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность», СЭЭ-2006, НТУ «ХПИ», Украина, г.Алушта, 2006г.
- на всероссийской конференции-конкурсном отборе инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение», ТПУ, г.Томск, 2006 г.
- на серии международных научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», СТТ, ТПУ, г.Томск, 2004-2007 гг.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 18 работах, в том числе в 2 статьях в центральной печати, в 15 статьях и тезисах доклада и 1 свидетельстве об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 162 страницы, включая 72 рисунка, 15 таблиц и списка литературы из 70 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведён анализ основных требований, предъявляемых к стенду для проведения нагрузочных испытаний ЭПЗА магистральных нефтепроводов.

В первом разделе рассматриваются особенности конструкции и эксплуатации ЗА магистральных нефтепроводов. Приводится классификация существующих типов арматуры, основные особенности и отличия.

По своей конструкции задвижки представляет собой класс ЗА, в которых запорный орган совершает возвратно-поступательные движения перпендикулярно оси перемещения потока рабочей среды. На рис.1 представлен поперечный разрез задвижки, поясняющий особенности её конструкции.

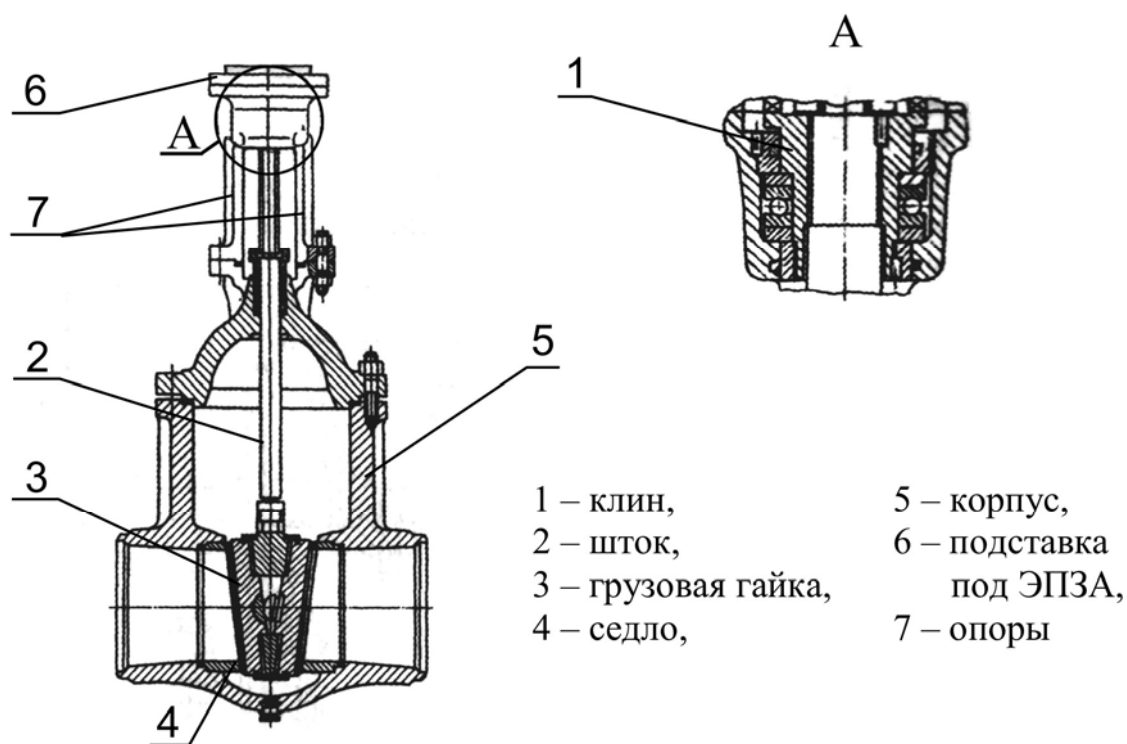


Рис.1. Конструкция задвижки

Выходной момент ЭПЗА прикладывается к грузовой гайке 1, преобразующей вращательное движение в поступательное перемещение штока 2. Нижний конец штока перемещает клин 3, образующий совместно с седлом 4 межуплотнительное пространство задвижки.

На современном этапе в арматуростроении и при эксплуатации ЗА преобладает подход, при котором основную роль в устранении протечек отводят геометрическим и структурным параметрам герметизаторов. В данном случае усилие, прилагаемое к герметизаторам, является строго рег-

ламентированным. Превышение установленного усилия влечёт за собой деформацию герметизаторов и, как следствие, потерю внутренней герметичности. Недостаточное усилие приводит к образованию щели в затворе и, следовательно, к появлению протечек.

Для каждого типа задвижек регламентированы паспортные значения усилий уплотнения и срыва клина с уплотненного состояния. Данные усилия зависят от материалов, применяемых для изготовления уплотнительных поверхностей, их размерных характеристик, условий эксплуатации и других факторов.

Таким образом, требуемый уровень герметизации в задвижке можно получить путём осуществления комплексных мероприятий, которые должны привести к созданию условий, замедляющих процесс изменения исходных функциональных метрических параметров уплотнения. Одно из основных условий в повышении эксплуатационных свойств задвижки это совершенствование характеристик ЭП, который своими уплотнительными усилиями изменяет геометрические размеры уплотняющих поверхностей затвора и тем самым влияет на эксплуатационные свойства трубопроводной арматуры.

Во втором разделе определено математическое описание процессов в элементах запорной арматуры, позволяющее подробно рассмотреть механические нагрузки с учётом жесткости конструкции компонентов ЗА.

Перечислим основные компоненты задвижки, которые в процессе работы подвержены упругим деформациям:

- угловая и линейная деформация штока задвижки,
- линейная деформация опор для подставки под ЭПЗА,
- жесткость в компонентах уплотнения,
- отложения в затворе, появляющиеся во время эксплуатации задвижки.

Математическое описание для имитационной модели задвижки с учётом влияния упругих связей получаем при последовательном переходе от многомассовой системы к эквивалентной двухмассовой, (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{энза} - M_{12} - M_{c1} \\ \frac{dM_y}{dt} = c_{\varphi 12} (\omega_1 - \omega_2) \\ M_{\epsilon} = b_{\epsilon 12} (\omega_1 - \omega_2) \\ M_{12} = M_y + M_{\epsilon} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{ви} - M_{c2} - M_{\kappa} \\ \frac{dL_{ui}}{dt} = \omega_2 k_{\epsilon} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $M_{энза}$ – моментное усилие, воздействующее на входной вал задвижки со стороны ЭПЗА,

M_{12} – результирующий момент, передаваемый через упругое звено,

M_{c1} – момент смешанного трения на валу первой массы (грузовая гайка, упорный подшипник качения),

M_{c2} – момент смешанного трения на валу второй массы, приведённый к вращательному движению входного звена задвижки (направляющие штока, герметичное уплотнение штока),

M_y – упругий момент,

M_e – момент внутреннего трения упругого звена,

$M_{виш}$ – момент от составляющей веса системы шток-клин, приведённый к вращательному движению входного звена задвижки,

M_k – момент заклинивания, приведённый к вращательному движению входного звена задвижки и создаваемый при контакте клина с седлом,

ω_1 – частота вращения первой массы (входной вал задвижки),

ω_2 – частота вращения второй массы (поступательное перемещение штока и клина, приведённое к вращательному движению входного вала),

$L_{ш}$ – линейное перемещение штока,

k_e – коэффициент передачи винта,

J_1 – момент инерции первой массы (момент инерции входного вала задвижки, грузовой гайки и суммарный момент инерции компонентов ЭПЗА приведённый к входному валу задвижки),

J_2 – момент инерции второй массы (инерционность поступательного движения системы шток-клин приведенная к вращательному движению входного вала),

$c_{\varphi 12}$ – коэффициент эквивалентной угловой жесткости, учитывающий суммарную упругость элементов задвижки,

b_{e12} – коэффициент внутреннего вязкого трения.

На основании системы уравнений (1) получаем структурную схему имитационной модели задвижки с учетом влияния суммарной упругости и зазоров в кинематической цепи, рис.2.

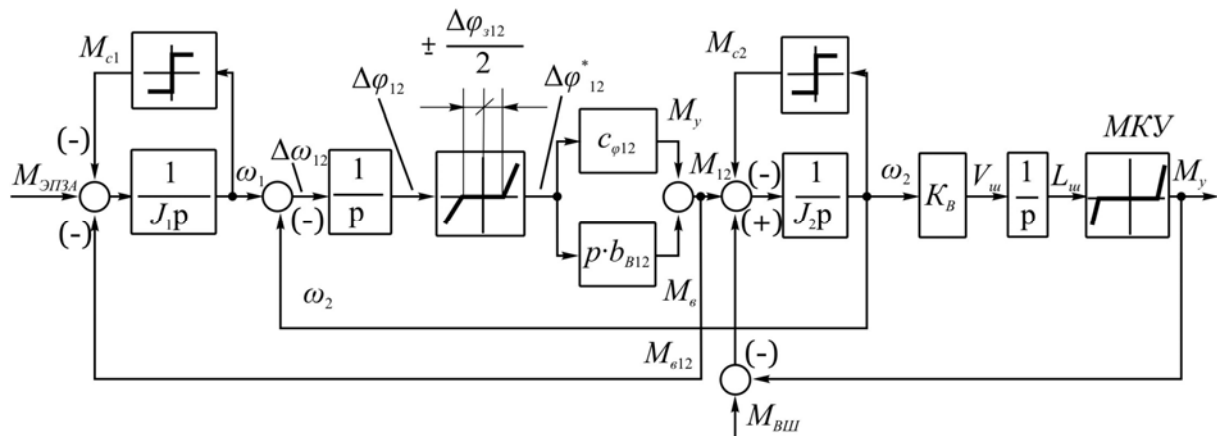


Рис.2. Структурная схема имитационной модели задвижки

Анализ исследований имитационной модели на базе математического описания нагрузочных усилий в элементах задвижки с учётом влияния упругих элементов выявил перекручивание грузовой гайки и наличие механических колебаний в компонентах ЗА при закрытии клина, рис.3.

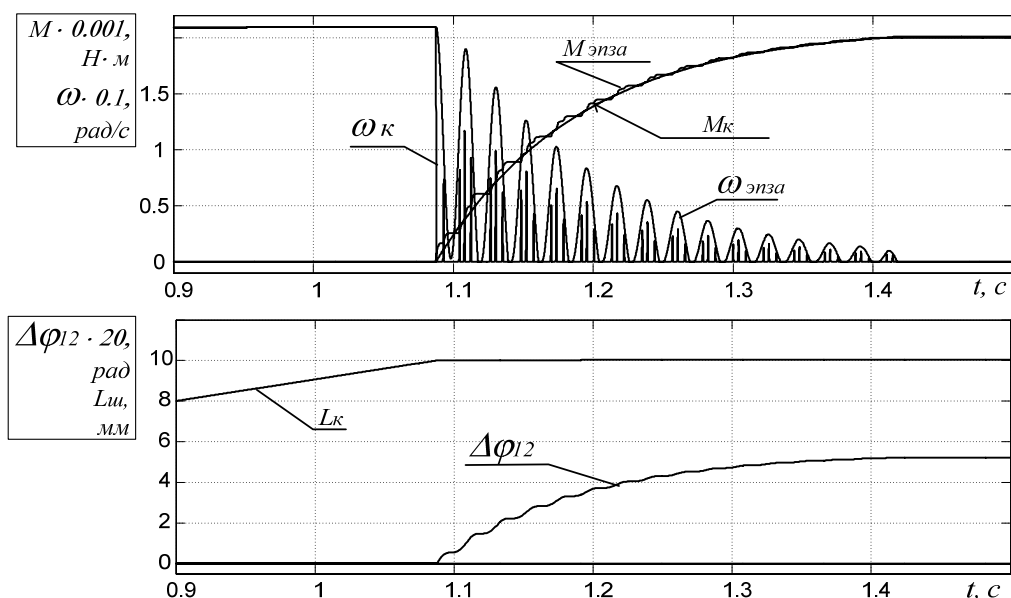


Рис.3. Графики переходных процессов при закрытии клина задвижки

Третий раздел посвящён обзору систем ЭП для управления ЗА. Рассматриваются различные варианты организации систем ЭПЗА, включая реализацию силового преобразователя и системы управления.

Производством ЭПЗА занимаются многие российские и зарубежные предприятия, рис.4. ЭП данной конструкции имеют, как правило, исполнение с возможностью установки во взрывоопасной зоне, и включают в свой состав блок управления и редуктор. Блок управления реализует функции управления двигателем, осуществляет защиту и мониторинг состояния системы, а также поддерживает коммуникации с внешними устройствами [3, 4].



Рис.4. ЭПЗА производства различных фирм

В рамках четвёртого раздела выделяются общие требования, предъявляемые к ЭПЗА.

В качестве основного требования к ЭПЗА выделяется задача обеспечения безопасности эксплуатации трубопроводов (прежде всего магистральных нефтепроводов) при одновременном снижении эксплуатационных затрат.

Безопасность обеспечивается за счет учета при проектировании ЭП большинства возможных эксплуатационных ситуаций, которые могут нарушить его работоспособность. Прежде всего, это связано с работой при отклонениях параметров питающей сети от нормы. Безопасность также обеспечивается за счет увеличения скорости перекрытия затвора задвижки и получения максимального усилия срыва уплотненного клина из седла задвижки [3, 4].

Пятый раздел посвящён анализу механической конструкции испытательного стенда и формированию требований к нагрузочному электроприводу для проверки ЭПЗА. На рис.2 представлено устройство испытательного стенда для проведения нагрузочных испытаний [5, 6].

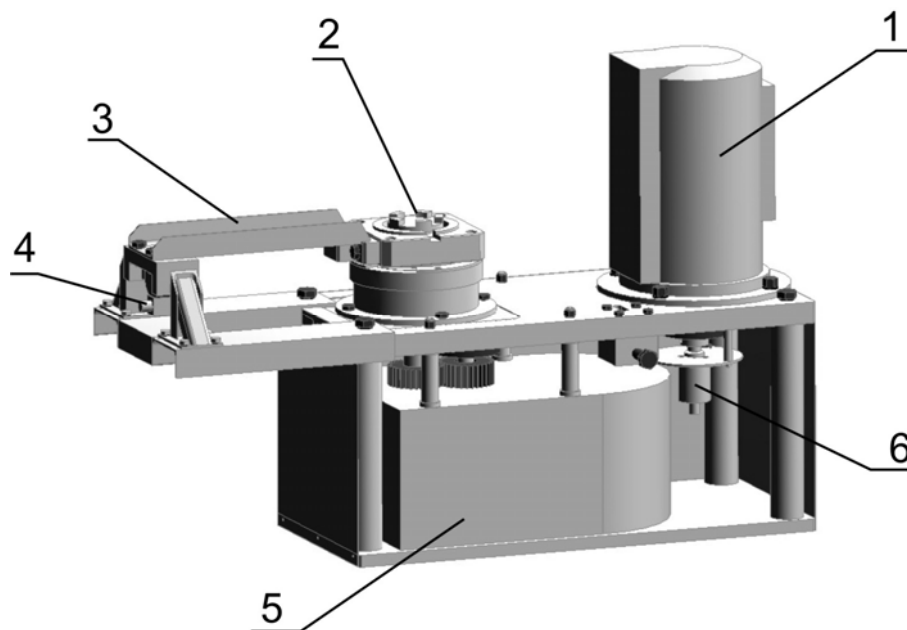


Рис.4. Внешний вид испытательного стенда для нагрузочных испытаний

На рис.4 представлены следующие компоненты нагрузочного стенда:

- 1 – АД нагрузочного моментного ЭП,
- 2 – место для установки испытуемого ЭПЗА,
- 3 – измерительное плечо,
- 4 – тензометрический датчик момента,
- 5 – редуктор,
- 6 – инкрементный датчик скорости.

Моментное усилие, развиваемое на валу АД 1, передаётся к редуктору 5 и далее поступает к выходу испытуемого ЭПЗА, 2. В процессе работы скорость АД измеряется датчиком 6, а крутящий момент, развиваемый между выходным валом и основанием испытуемого ЭПЗА, контролируется с помощью измерительного плеча 3 и тензометрического датчика 4.

С учётом требований к нагрузочному ЭП, предъявляемых с позиции организации качественных испытаний ЭПЗА, определена требуемая мощность АД и силового преобразователя. Применительно к эксплуатационным характеристикам сформированы требования по диапазону регулирования частоты вращения, выходного момента и быстродействия нагрузочного моментного ЭП.

В второй главе рассматривается математическое описание компонентов нагрузочного асинхронного ЭП.

На основе второго закона Кирхгофа, закона Фарадея и метода пространственного вектора рассмотрены компактные уравнения для математического описания асинхронной машины: в стационарной системе координат (2) и в системе координат ориентированной по вектору потокосцепления ротора (3).

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{s\alpha} - r_e i_{s\alpha} + k_r a_r \psi_{r\alpha} + k_r \omega_r \psi_{r\beta}) \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{s\beta} - r_e i_{s\beta} + k_r a_r \psi_{r\beta} - k_r \omega_r \psi_{r\alpha}) \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = r_r k_r i_{s\alpha} - a_r \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = r_r k_r i_{s\beta} - a_r \psi_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} \\ m = k_m (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_{назр}) \end{cases} \quad (2)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ – компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора,

$\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – компоненты пространственного вектора потокосцепления ротора,

r_e , r_r , a_r , k_r , k_m – коэффициенты, учитывающие параметры АД,

J , ω_r , m – момент инерции, частота вращения и момент, развиваемый на валу АД.

Структурная схема имитационной модели, реализованная согласно (2) даёт возможность рассмотреть процессы с наибольшим приближением к реальному АД, что удобно при исследовании статических и динамических режимов, рис.5.

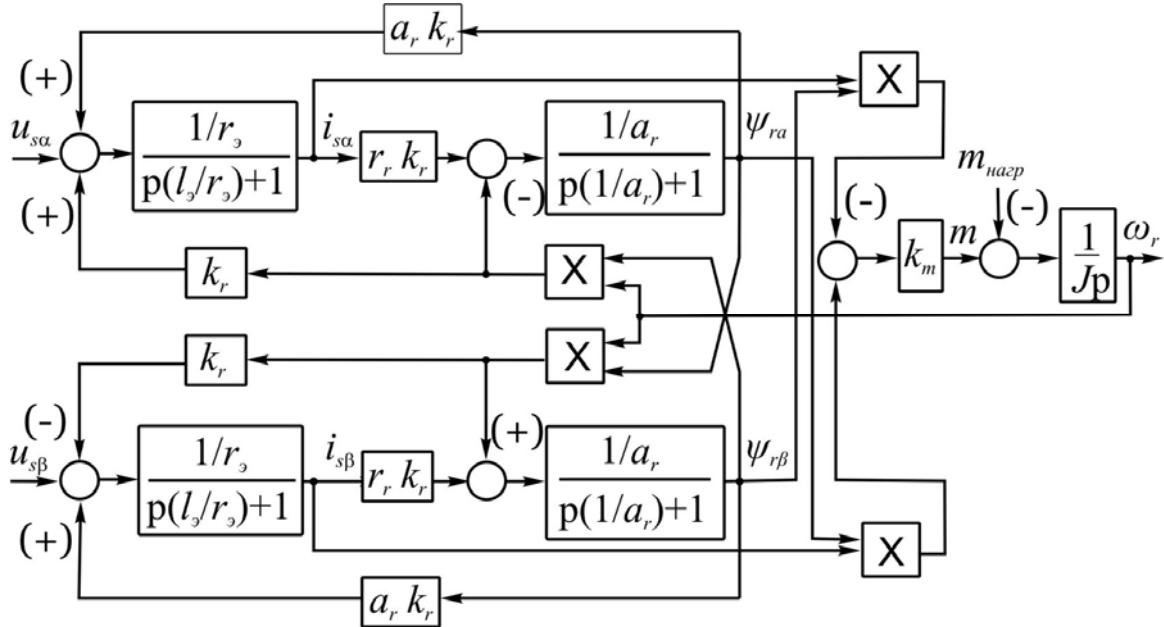


Рис.5. Структурная схема имитационной модели АД в стационарной системе координат

Вариант имитационной модели АД во вращающейся системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора наиболее удобен для представления АД в качестве объекта при синтезе системы управления ввиду упрощения математического описания (3) и уменьшения перекрёстных связей, рис.6.

$$\begin{cases} \frac{di_{sx}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sx} - r_e i_{sx} + k_r a_r \psi_r + l_e \omega_k i_{sy}) \\ \frac{di_{sy}}{dt} = \frac{1}{l_e} (u_{sy} - r_e i_{sy} - k_r \omega_r \psi_r - l_e \omega_k i_{sx}) \\ \frac{d\psi_r}{dt} = r_r k_r i_{sx} - a_r \psi_r \\ 0 = r_r k_r i_{sy} - \beta_k \psi_r \\ m = k_m (\Psi_{rx} I_{sy}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (m - m_{нагр}) \end{cases} \quad (3)$$

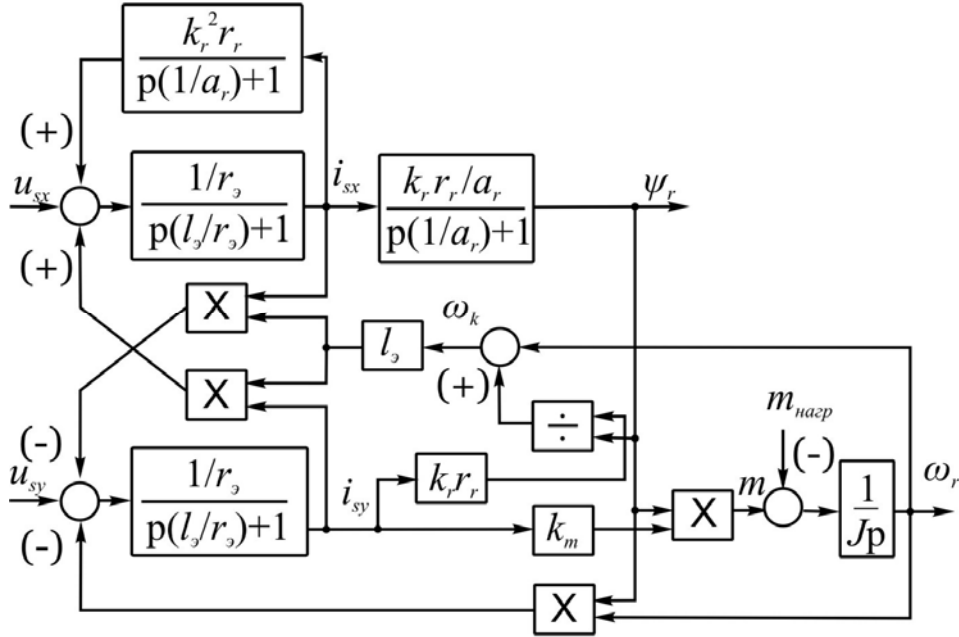


Рис.6. Структурная схема имитационной модели АД в системе координат с ориентацией по вектору потокосцепления ротора ψ_r

Несмотря на различные способы организации имитационных моделей в обоих случаях установлена идентичность и соответствие переходных процессов реальному АД, что свидетельствует о правильно выполненной разработке.

Для удобства проведения исследований и анализа режимов АД использована система относительных единиц с ориентацией на номинальный режим работы, что позволяет рационально масштабировать уравнения и привести их к виду, удобному для математического моделирования вычислительными средствами с ограниченными ресурсами.

Анализ свойств автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией как дискретно-управляемого объекта с позиций

Третья глава посвящена вопросам синтеза структуры и определения параметров системы управления нагрузочным асинхронным ЭП.

Для решения задачи формирования нагрузочного момента, имитирующего усилия, прикладываемые к ЭПЗА со стороны элементов ЗА, на основе математического описания (1) создано устройство для имитации нагрузочных моментов с программной реализацией. Здесь и далее в работе под определением данного модуля будем подразумевать имитационный формирователь моментов нагрузки (ИФМН).

В соответствии с требованиями к работе испытательного стенда сигнал на выходе ИФМН должен полностью имитировать рабочие режимы различных типов ЗА при перемещении клина задвижки, задавая требуемое значение для ограничения нагрузочного момента m_{max} в функции угла поворота выходного звена ЭПЗА, имитируя свойства упругости ЗА.

На рис.7 представлена функциональная схема системы векторного управления нагрузочным асинхронным ЭП для случая работы в режиме упора. Система базируется на имитационной модели АД во вращающихся координатах, сориентированных по вектору потокосцепления ротора и представляет собой классическую структуру векторного управления с дополнительным внешним контуром положения. Для поддержания высокой стабильности характеристик и максимального быстродействия используется режим работы при задании постоянного потокосцепления ротора.

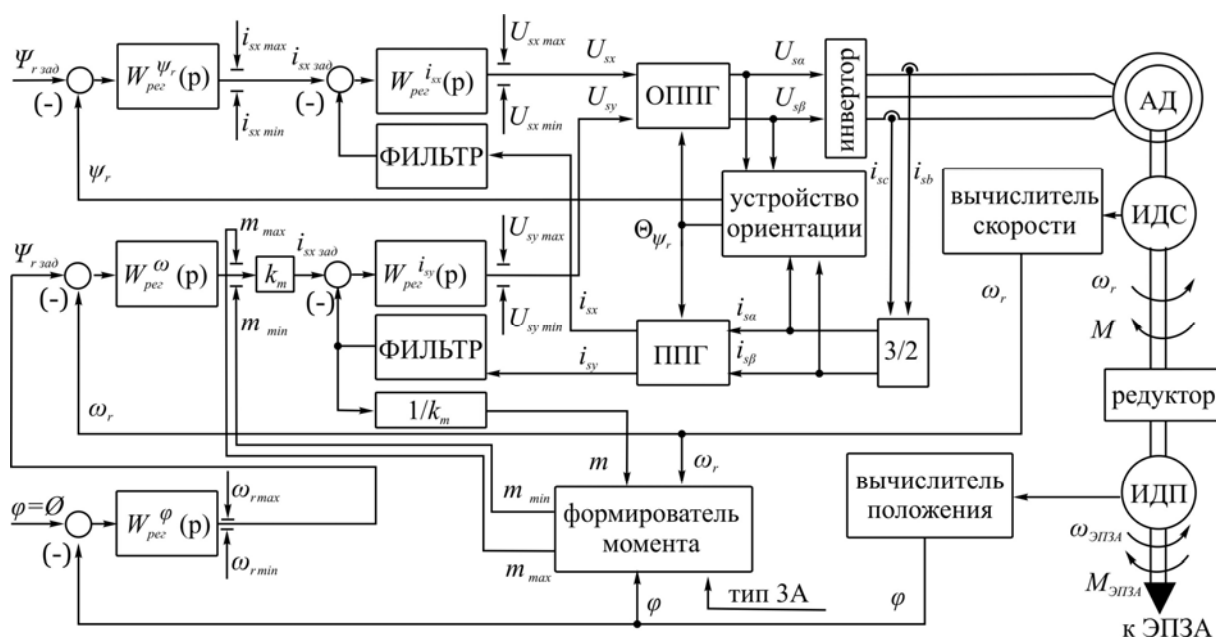


Рис.7. Функциональная схема системы векторного управления моментным асинхронным ЭП для случая работы в режиме упора

При синтезе регуляторов для управления составляющими вектора тока статора и потокосцеплением ротора использовался метод определения желаемой передаточной функции с настройкой на модульный оптимум. Для контуров управления частотой вращения и положением, ввиду минимизации ошибки по возмущению использована настройка на симметричный оптимум [15, 17, 18]. По итогам синтеза регуляторов показатели качества в линеаризованной системе соответствуют ожидаемым значениям.

Для минимизации взаимного влияния между перекрёстными контурами управления потокосцеплением ротора и скорости использовано их преднамеренное разделение по быстродействию. При синтезе регуляторов малая некомпенсируемая постоянная времени для контура скорости принята в четыре раза большей, чем аналогичная постоянная времени для контура управления потокосцеплением. Это дало возможность уменьшения взаимного влияния перекрёстных контуров в оптимизированной системе асинхронного ЭП.

Для решения задачи косвенного определения переменных параметров АД, недоступных для прямого измерения, но необходимых для организации качественного векторного управления использовано устройство вычисления переменных на базе обращённой имитационной модели АД с автоматической системой для компенсации внешних возмущений [13, 14].

В четвёртой главе рассматриваются вопросы экспериментального исследования работы нагрузочного асинхронного ЭП. Перед использованием разработанной системы управления в составе реального асинхронного ЭП с ПЧ производилась предварительная проверка работоспособности и оценка показателей качества. В данном случае наиболее удобным инструментом для проверки является метод имитационного моделирования эксплуатационных режимов работы разрабатываемой системы. На рис.8. представлены графики переходных процессов в имитационной модели моментного асинхронного ЭП при имитации нагрузочных усилий 3А в режиме стопорения клина.

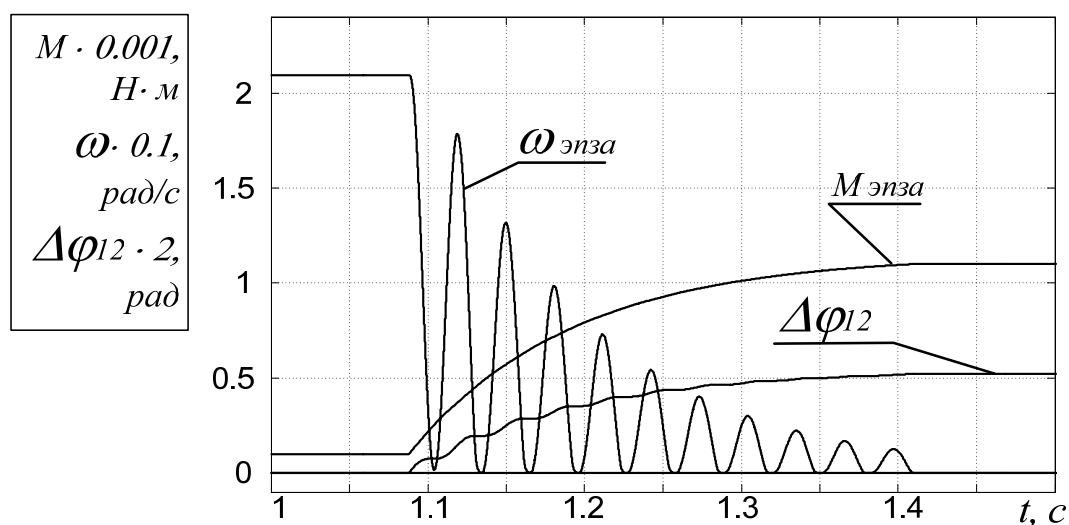


Рис.8. Переходные процессы в имитационной модели моментного асинхронного ЭП при имитации нагрузочных усилий 3А в режиме стопорения клина

Анализ графиков переходных процессов на рис.8 показывает, что нагрузочный моментный ЭП выполняет имитационное формирование усилий, прикладываемых со стороны ЗА и соответствует требованиям, предъявляемым при проведении испытания ЭПЗА.

На рис.9 представлена аппаратная реализация моментного асинхронного ЭП для создания усилий, имитирующих работу ЗА. Система управления организована на базе цифрового сигнального микропроцессора TMS320F2812 компании Texas Instruments из специализированной серии C2000, предназначенной для управления ЭП. На микроконтроллер возложены функции мониторинга состояния системы осуществляемого с помощью датчиков в звене выпрямленного напряжения и датчиков тока статора АД [1, 2]. Контроль за положением и скоростью системы выполняется с помощью импульсных квадратурных датчиков положения (ДП), установленном на выходном валу ЭПЗА, и скорости (ДС), расположенном на валу АД.

Необходимый набор защитных функций, система векторного управления и формирователь моментных усилий реализованы программно на базе ресурсов микропроцессора.

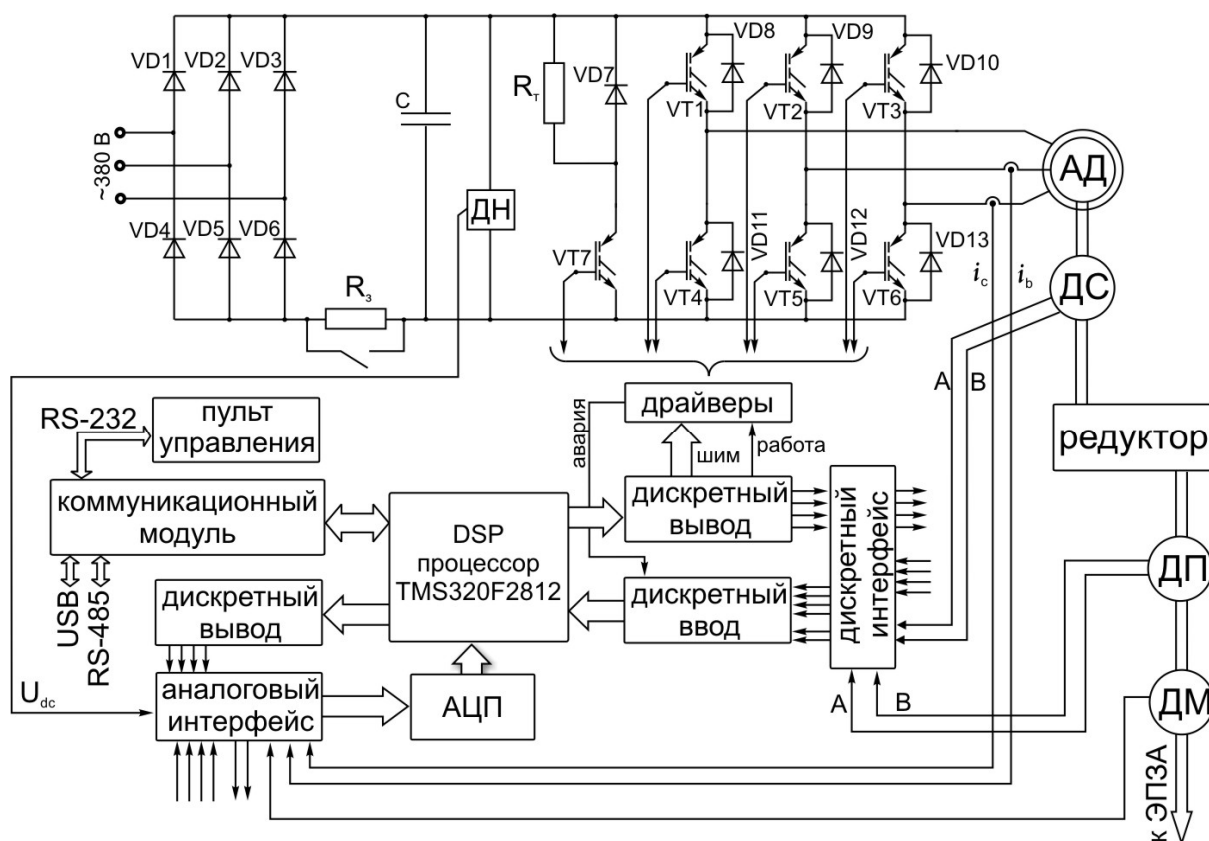


Рис.9. Аппаратная реализация моментного асинхронного ЭП

Среда программирования Code Composer Studio 3.1 и аппаратные средства для отладки микропроцессора TMS320F2812 позволяют выполнить программную реализацию системы управления и дают возможность получить графики работы в режиме реального времени. На рис.10 представлены экспериментальные графики переходных процессов в моментном

асинхронном ЭП при имитации нагрузочных усилий в режиме стопорения клина. Параметры работы ЭП аналогичны рассмотренным ранее при имитационном моделировании, рис.9.

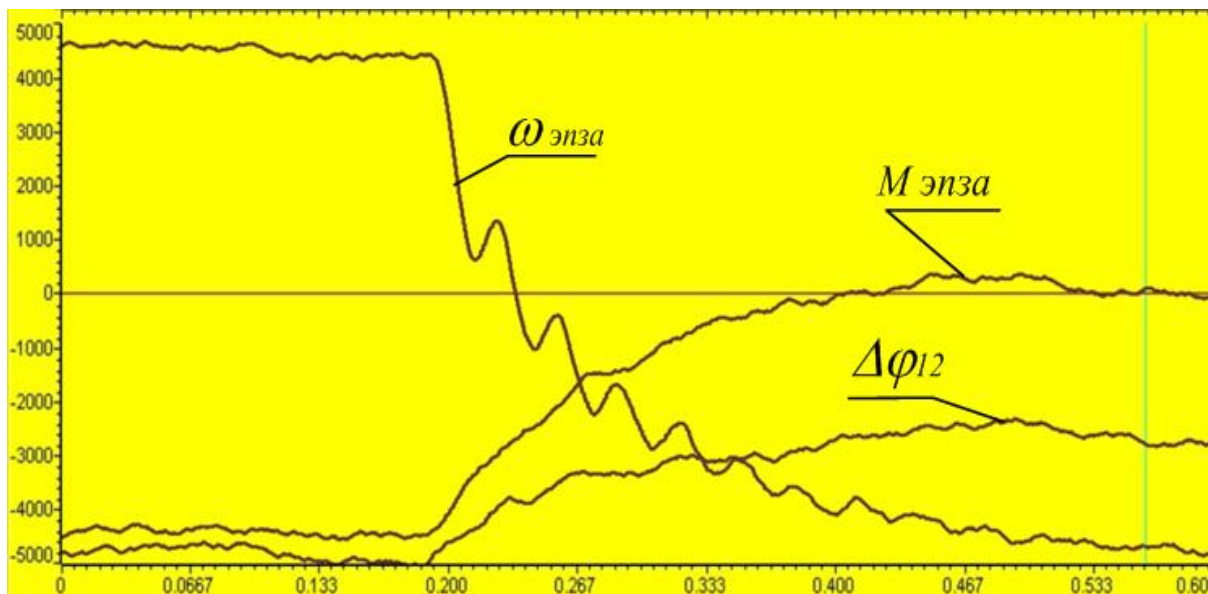


Рис.10. Переходные процессы в моментном асинхронном ЭП при имитации нагрузочных усилий ЗА в режиме стопорения клина

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о незначительном расхождении между результатами имитационного моделирования и данными эксперимента, что свидетельствует о правильности выполненной работы.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы, рекомендации по их применению, описана их новизна и практическая значимость.

В приложении представлены имитационные модели, реализованные в программном пакете Matlab, а также приведены сведения о внедрении результатов выполненной работы в производство и учебный процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые в работе исследования позволили получить следующие основные результаты:

1. По итогам исследований и проведения анализа математической имитационной модели запорной арматуры определены особенности изменения формы кривой, необходимой для имитации моментных усилий запорной арматуры магистральных нефтепроводов применительно к ЭПЗА. На основе полученных данных разработан алгоритм имитационного формирования нагрузки для моментного ЭП, позволяющий имитировать нагрузочные усилия со стороны ЗА, что даёт возможность организовать проведение качественных испытаний ЭПЗА различных типов.

2. На базе метода пространственного вектора предложены математические описания процессов в АД с последовательным переходом к имитационным моделям в виде двух вариантов структурных схем: в стационарной системе координат и во вращающейся с ориентацией по вектору потока сцепления ротора. Первый вариант удобен при исследовании и анализе режимов работы АД, а второй даёт возможность рассмотреть АД с позиций объекта оптимального управления и создаёт предпосылки для разработки качественных систем управления.

3. Предложена методика синтеза структуры и параметров для оптимальной настройки системы векторного управления асинхронным нагрузочным ЭП. Благодаря предложенному варианту определения малых некомпенсируемых постоянных времени, данная методика позволила минимизировать взаимное влияние перекрёстных контуров управления потоком сцеплением ротора и скорости.

4. Разработано программное обеспечение для микроконтроллерной системы управления асинхронным моментным ЭП, применяемым в составе нагрузочного стенда для организации приёмочных испытаний ЭПЗА в заводских условиях.

5. Предложенные в работе решения используются на предприятии ЗАО «ЭЛЕСИ» г.Томск для организации и проведения испытаний серийно выпускаемых ЭПЗА. Проведение испытаний в автоматизированном режиме позволило более чем в два раза снизить время, необходимое для проверки ЭПЗА при одновременном улучшении качества настройки, что в итоге улучшает режимы работы ЗА и повышает безопасность эксплуатации нефтепроводов.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах.

1. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В., Нечаев М.А. Опыт разработки преобразователя частоты для асинхронного электропривода общепромышленного применения//Электротехника. – 2005 г. -№ 9. - С.23-26.

2. Антропов А. А., Гарганеев А. Г., Каракулов А. С., Ланграф С. В., Нечаев М. А. Серия преобразователей частоты компании ЭЛЕСИ для общепромышленного применения//Сборник трудов конференции ЭППТ-2005, УГТУ-УПИ, 2005. С. 85–89

3. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В., Черемисин В.Н. Интеллектуальные электроприводы ЗАО «ЭлеСи» для запорно-регулирующей арматуры//Сб. материалов 5 Конгресса нефтегазопромышленников России (8-10 сентября 2004). Казань.-2004.- С. 120 – 122.

4. Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В., Саидов В.С. Особенности применения и принципы построения электроприводов запорной арматуры трубопроводного транспорта нефтепродуктов// Технічна електродинаміка, тематичний випуск, Силова електроніка та

енергоефективність, Частина 2, Інститут електродинаміки НАН України, Київ 2006.

5. Гарганеев А.Г., Ланграф С.В. Испытательный стенд для проверки электроприводов запорной арматуры// Технічна електродинаміка, тематичний випуск, Силовая електроніка та енергоефективність, Частина 5, Інститут електродинаміки НАН України, Київ 2006.

6. Гарганеев А.Г., Ланграф С.В. Стенд для нагрузочных испытаний электроприводов. Материалы III-ей всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и силовая электроника» (АЭПЭ-2006), Новокузнецк 2006.

7. Гарганеев А.Г., Яровой А.Т., Бабушкина Л.Ю., Каракулов А.С., Ланграф С.В., Расстригин А.А. Энергосберегающая модификация векторного управления асинхронного двигателя. Известия Томского политехнического университета, №7 2005, Т.308, Изд-во ТПУ, 2005, С.130-134.

8. Дементьев Ю.Н., Ланграф С.В. Управление моментом в асинхронном электроприводе вращающей печи барабанного типа. Сборник трудов международной научно-технической конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», Екатеринбург, 2003 г.

9. Каракулов А.С., Красилёв В.В., Ланграф С.В., Марьянов А.Ю. Регулирование момента электропривода в системе асинхронный двигатель - тиристорный регулятор напряжения// Труды V межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии» (АПТ-2005). Новоуральский государственный технический институт, Новоуральск – 2005.

10. Каракулов А.С., Ланграф С.В. Оптимизация использования процессорного времени в многозадачных приложениях систем управления электроприводов. // Материалы международной научно-технической конференции, «Электромеханические преобразователи энергии» 20-22 октября 2005 г., Томск: ТПУ. С.127-134.

11. Каракулов А.С., Ланграф С.В. Способ разработки многозадачного программного обеспечения для управления преобразователем частоты. //Материалы второй научно-технической конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (ЭЭЭ-2005). Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск – 2005. С.83-86.

12. Каракулов А.С., Ланграф С.В. Процедура идентификации моментного усилия электроприводов запорной арматуры магистральных нефтепроводов. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613464. Роспатент. Москва, 5.10.2006.

13. Ланграф С.В. Определение момента асинхронного двигателя в статическом режиме// Материалы пятой научно-практической конференции (Томск, 21-22 октября 2004 г.). Изд-во Томского университета систем управления и радиоэлектроники, 2004. С. 53, 54.

14. Ланграф С.В. Косвенное определение момента в асинхронном электроприводе // Труды X-ой Международной научно-практической кон-

ференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», ТПУ, Томск 2004г.

15. Ланграф С.В. Оптимизация систем векторного управления асинхронных электроприводов // Материалы XII-ой Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2006), Изд-во ТПУ, 2006, С. 68-70.

16. Ланграф С.В. Разработка программных алгоритмов энергоэффективного управления тиристорными устройствами плавного пуска асинхронных двигателей // Материалы Всероссийской конференции конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение», Томск: Изд-во ТПУ, 2006.

17. Расстригин А.А., Ланграф С.В. Математическая модель системы векторного управления асинхронным двигателем // Материалы международной научно-технической конференции, «Электромеханические преобразователи энергии» (ЭПЭ-2005): Изд-во ТПУ, 2005г., С.209-213.

18. Langraf S.V., Obratsov K.V. Optimization of vector control system induction motor drives // Modern techniques and technologies. MTT-2006. Proceedings of the 12-th International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, 27-31 March, 2006 Tomsk, Russia. Изд. ТПУ. – Р. 68-70.

Личный вклад автора

Автором единолично написано четыре работы [13–16]. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: анализ режимов эксплуатации ЭПЗА [3–6] (25%), оптимизация систем управления асинхронными ЭП [7–9, 17, 18] (50%), косвенное определения переменных АД, недоступных для прямого измерения [12] (75%), разработка программных алгоритмов для микроконтроллерного управления [1, 2, 10, 11] (50%).