

На правах рукописи

Каракулов Александр Сергеевич

**МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2005

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Зайцев А.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бейнарович В.А.

кандидат технических наук, доцент
Баранов П.Р.

Ведущее предприятие: ГНУ «Научно-исследовательский институт
автоматики и электромеханики при
ТУСУР», г.Томск

Защита состоится 28 декабря 2005 года в 17 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в ауд.331 8 учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г.Томск, ул.Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «___» ноября 2005 г.

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

Ю.Н.Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном уровне развития микропроцессорных средств и силовой электроники среди критериев оценки эффективности электропривода на передний план выходят степень адаптации устройства к обслуживаемому процессу, себестоимость, надежность и время разработки.

Электропривод запорной арматуры применяется в технологическом процессе перекачки нефтепродуктов. Нарушение нормального хода процесса может привести к тяжелым экономическим и экологическим последствиям. В связи с этим при разработке системы управления данного электропривода необходимо решать задачи как повышения надежности самого устройства (в том числе и его программного обеспечения), так и его способности обеспечивать функционирование в различных эксплуатационных ситуациях.

Современный электропривод арматуры представляет собой сложный мехатронный модуль, объединяющий в себе систему управления, асинхронный двигатель и редуктор. Снижение себестоимости, повышение надежности и компактности электронного блока управления связано с применением однопроцессорных систем, что в свою очередь вносит существенное ограничение на вычислительные возможности системы управления. Тем не менее, система управления должна обеспечивать все необходимые процессы, протекающие в современном электроприводе: формирование задания на скорость и момент в зависимости от внешних сигналов и условий, электромеханическое преобразование энергии в двигателе с максимальной степенью эффективности, формирование защит двигателя, преобразователя и механизма, поддержка коммуникаций с другими микропроцессорными системами.

Анализ состояния вопроса показал, что можно получить новые эксплуатационные характеристики электропривода арматуры за счет применения встроенной микропроцессорной системы управления. Вышеизложенное обуславливает актуальность задач, решаемых в диссертации, определяет цели и задачи исследования.

Работа проводилась в рамках планов НИОКР «АК ОАО Транснефть» на 2002-2004 гг.

Целью работы является повышение эффективности электропривода запорной арматуры магистрального нефтепродуктопровода за счет разработки и применения микроконтроллерного управления.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать основные требования, предъявляемые к электроприводам запорной арматуры.
2. Разработать методику создания программного обеспечения для однопроцессорных блоков электронного управления, позволяющего обеспечивать выполнение всех задач электропривода в режиме реального

времени и с учетом рабочих областей применяемых алгоритмов управления.

3. Разработать математические модели электропривода запорной арматуры со встроенными преобразователем частоты и тиристорным регулятором и провести исследование электропривода на разработанных моделях.

4. Разработать и экспериментально проверить методики синтеза алгоритма управления, обеспечивающего максимальную производительность, максимальный цикловой КПД и требуемые ограничения по моменту и токовым перегрузкам для электропривода запорной арматуры с тиристорным регулятором напряжения и преобразователем частоты.

Методы исследований. В диссертационной работе использовались теоретические и экспериментальные методы. Теоретическое исследование основано на методах математического моделирования. Использован математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления, а также численные методы при решении систем дифференциальных уравнений. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях и на действующих нефтепроводах в полевых условиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлено изменение коэффициента передачи по моменту волнового редуктора с промежуточными телами качения, входящего в состав электропривода задвижки, в зависимости от режима работы и передаваемого момента.
2. Предложен способ формирования алгоритма управления, позволяющий учесть ограничения на рабочие области фазового пространства имеющихся программных процедур управления системы и процедур восстановления её координат.
3. Предложен способ обеспечения расчета основных задач электропривода в режиме реального времени и универсальный шаблон мультизадачного приложения.
4. Разработаны алгоритмы достижения максимальной производительности для электропривода запорной арматуры с учетом ограничений, вносимых рабочими областями применяемых алгоритмов восстановления координат и управления.

Практическая ценность работы:

1. Обеспечено снижение затрат на ремонт и эксплуатацию запорной арматуры за счет увеличения точности ограничения момента на выходном валу электропривода.
2. Повышена безопасность технологического процесса перекачки нефтепродуктов за счет создания нового алгоритма работы защит электропривода и обеспечения максимально возможной скорости движения.

3. Предложена методика создания программного обеспечения, которая позволила снизить время разработки и повысить надежность программного обеспечения. Разработанное на базе данной методики программное обеспечение позволяет выполнять вычисления в режиме реального времени.

4. Разработано прикладное программное обеспечение, позволяющее исследовать процессы в электроприводе арматуры методом имитационного моделирования.

Реализация результатов работы. На предприятии ЗАО «Элеси» (г.Томск) освоено серийное производство электронных блоков «БУР», «ПБЭ-2,5» и «ESD-VC» для управления электроприводами запорной арматуры «ЭЩ» и «Ангстрем» (производства ЗАО «ТомЗЭЛ» г.Томск) и электропривода «Томприн» (производства «Сибирский машиностроитель», г.Томск). Данные блоки эксплуатируются в АК «Транснефть» и АК «Транснефтепродукт», а также экспортируются в другие страны в составе электропривода «Элесиб» (производства ЗАО «Элеси»). Методика разработки мультизадачного программного обеспечения является базовой при разработке новых устройств управления двигателями в ЗАО «Элеси», и используется в учебном процессе кафедры ЭПЭО ТПУ при изучении курса «Микропроцессорные системы управления».

На защиту выносятся:

1. Методика разработки алгоритма управления с учетом ограничений, накладываемых рабочими областями применяемых программных процедур управления и восстановления координат.

2. Структура организации программного обеспечения для электроприводов с микропроцессорной системой управления, реализующая необходимые функции управления в режиме реального времени.

3. Алгоритмы достижения максимальной производительности с учетом имеющихся ограничений для электропривода арматуры с тиристорным регулятором напряжения и преобразователем частоты.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на международных научно-технических конференциях «Электромеханические преобразователи энергии», г.Томск 2002-2005 гг.
- на всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке, производстве», г.Новокузнецк 2003 г.
- на научно-практических конференциях «Современные средства и системы автоматизации», г.Томск 2002-2005 гг.
- на международной научно-практической конференции «Электропривод переменного тока», г.Екатеринбург 2005 г.
- на международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», г. Томск 2003 г.
- на научно-технической конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», г. Новосибирск 2005 г.

- на 5-том конгрессе нефтегазопромышленников России, г.Казань 2004 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 20 научных работах, в том числе 16 статьях и тезисах докладов, 3-х отчетах по НИОКР и 1 патенте РФ.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 130 страниц, включая 30 рисунков, 15 таблиц, списка литературы из 70 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимой разработки, сформирована цель диссертационной работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ основных требований, предъявляемых к электроприводу арматуры, в частности к электроприводу задвижки магистрального нефтепровода (рис.1). Выявлены основные преимущества применения микропроцессорной реализации электроприводов арматуры, рассмотрены силовые схемы выпускающихся блоков управления (рис.3,4), проведено исследование режимов работы редуктора с промежуточными телами качения, применяемыми для электроприводов задвижек магистральных нефтепроводов.

Основным требованием к электроприводу арматуры является обеспечение безопасности эксплуатации трубопроводов (прежде всего магистральных нефтепроводов) при снижении эксплуатационных затрат. Безопасность обеспечивается за счет учета при проектировании электропривода большинства возможных эксплуатационных ситуаций, которые могут нарушить работоспособность привода. Прежде всего, это связано с работой при отклонениях параметров питающей сети. Безопасность также обеспечивается за счет увеличения скорости перекрытия затвора задвижки и получения максимального усилия срыва уплотненного клина из седла задвижки. Обеспечение максимальной производительности при перекрытии связано с тепловым состоянием двигателя. Поэтому для сохранения перегрузочной способности двигателя на максимальном значении необходимо снижать его потери, обеспечивая энергетическую эффективность привода при ограничении на минимально-возможную производительность. Для оценки энергетической эффективности за один цикл перемещения штока использован параметр циклового КПД¹:

¹ Браславский И.Я., Плотников Ю.В. Математические модели для определения энергопотребления различными типами асинхронных электроприводов и примеры их использования // Труды 13 международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ – 05 (15-18 марта 2005). Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2005. С. 178.

$$\eta_{ц} = \frac{W_{мех}}{W_1} = \frac{\int_0^{T_{ц}} P_{мех} dt}{\int_0^{T_{ц}} P_1 dt}, \quad (1)$$

где P_1 - полная мощность, потребляемая из сети,
 $P_{мех}$ - механическая мощность на валу двигателя,
 W_1 – энергия, потребленная из сети,
 $W_{мех}$ – механическая энергия на выходном звене электропривода,
 $T_{ц}$ – время цикла работы производственного механизма (обычно составляет 1-10 минут).

Задача управления электроприводом арматуры сводится к двум подзадачам:

1. Достижение максимального приближения к заданной скорости перекрытия (обеспечение требуемой производительности при перемещении), определяемой параметрами технологического процесса:

$$\omega \Rightarrow \max \text{ при } \omega < \omega_{зАд}, \quad (2)$$

где ω - скорость двигателя, $\omega_{зАд}$ – скорость, требуемая согласно технологическому процессу, не менее.

2. Обеспечение в случае достижения заданной скорости максимального значения циклового КПД:

$$\eta \Rightarrow \max \text{ при } \omega \geq \omega_{зАд}. \quad (3)$$

Снижение эксплуатационных расходов связано с продлением срока службы арматуры. Электропривод за счет усилия уплотнения может нарушить состояние герметизаторов, тем самым привести к их пластической деформации и потери герметичности закрытого затвора арматуры – одного из основных параметров работоспособности задвижки. Система моментограничения электропривода должна учитывать характеристики применяемых в электроприводах волновых редукторов с промежуточными телами качения (рис.2). Как показали эксперименты, коэффициент передачи редуктора по моменту K_m является функцией от режима работы и момента нагрузки электропривода $M_{нагр}$ и изменяется в диапазоне от 0 до 35% по отношению к передаточному числу редуктора K_p . Были выявлены четыре основных состояния редуктора (соответствующие режимам работы электропривода арматуры), где изменение K_m можно прогнозировать:

1. Работа на упор при пуске с ударным приложением момента:

$$K_m = 0,8 K_p. \quad (4)$$

2. Работа на упор при пуске с плавным приложением момента:

$$K_m = 0,65 K_p \quad (5)$$

3. Работа в движении:

$$K_m = 0,9 K_p \times f(M_{нагр}) \quad (6)$$

4. Переход из режима движения в режим работы на упор:

$$K_m = 0,95 K_p. \quad (7)$$

Снижение эксплуатационных расходов также связано с применением современных коммуникационных технологий для дистанционного управления электроприводами. Наличие скоростного последовательного интерфейса предполагает высокую производительность процессора. В настоящее время все большее применение находят однопроцессорные устройства управления, имеющие меньшую себестоимость, высокую надежность и компактность. В связи с этим, необходимо максимально задействовать имеющиеся ресурсы процессора для обеспечения выполнения всех задач по управлению двигателем, защиты, восстановлению необходимых для управления координат, обеспечить информационный обмен с устройствами верхнего уровня АСУ ТП. Для решения этой задачи необходима разработка технологии, позволяющей создавать многозадачное программное обеспечение с выполнением жесткого режима реального времени. Алгоритм управления должен обеспечивать функционирование электропривода при наличии большого числа контролируемых аналоговых и дискретных величин, а также событий, полученных на их базе.

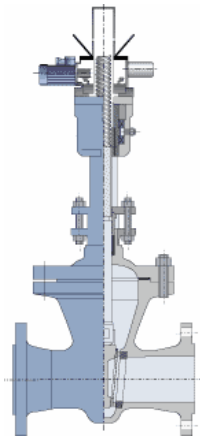


Рис.1. Клиновая задвижка магистрального нефтепровода



Рис.2. Устройство волнового редуктора с промежуточными телами качения



Рис.3. Электропривод запорной арматуры «Elesyb» с встроенным преобразователем частоты ESD-VC



Рис.4. Электропривод запорной арматуры «ЭПЦ-100» с встроенным тиристорным регулятором напряжения «БУР»

Во второй главе предложена концепция построения программного обеспечения для микропроцессорных систем управления электроприводами.

Для микропроцессорной системы управления предлагается ввести ограничение по рабочим областям используемых процедур управления и восстановления координат. Это связано с невозможностью создать единые эффективные (точные и быстрые) процедуры управления и восстановления координат для всей возможной области изменения фазовых координат системы. В данной работе это связано с невозможностью вычислить K_m , рассчитать момент двигателя при работе на несинусоидальном напряжении (система ТРН-АД) или при низких частотах вращения вала двигателя (система ПЧ-АД) во всех потенциально возможных режимах работы электропривода. Предлагается осуществлять перекрытие области изменения фазовых координат за счет нескольких имеющихся процедур, обладающих своими рабочими областями, и за счет управления избегать попадания координат системы в те области, для которых не существует приемлемой процедуры восстановления координат.

Программное обеспечение предлагается разрабатывать исходя из событий, происходящих в системе. Предложена следующая классификация событий электропривода:

1. Получение команд управления.
2. Достижение целей текущего управления.
3. События таймеров (истечения заданного промежутка времени).
4. События отклонения от нормального режима функционирования (с разделением на аварии и предупреждения).
5. Событие выхода координат из рабочей области применяемой процедуры восстановления координат.
6. Событие выхода координат из рабочей области применяемой процедуры управления.
7. Дополнительные события (приближение к краю рабочей области

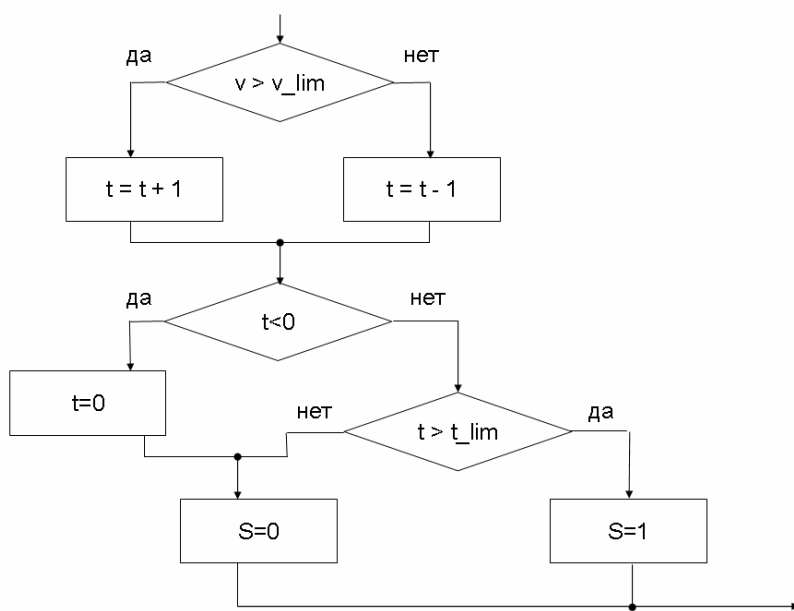


Рис. 5. Алгоритм формирования события (v – значение сигнала, v_{lim} – предельное значение сигнала, t – счетчик таймера, t_{lim} – максимальное время превышения сигнала критического значения, S – флаг события)

используемых процедур и т.д.).

Для формирования событий предлагается единый алгоритм (рис.5), являющийся программно-реализованным таймером. Данный алгоритм позволяет обрабатывать любые сигналы и формировать события с заданным временем задержки.

На базе представленного алгоритма предлагается сформировать компонент управления, который позволяет достигать определенную цель функционирования системы, работая в некоторой области фазового пространства. Так как событий в каждой группе может быть несколько, то предлагается объединить их в следующие множества:

1. Рабочая область процедуры восстановления координат ZO .
2. Область цели компонента ZA .
3. Область ограничений работы компонента ZL .

Пример множества рабочей области процедуры восстановления координат:

$$ZO = \left\{ \begin{array}{ccccc} zO_1 & zO_{\max_1} & t_{zO_1} & s_{zO_1} & rO_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ zO_m & zO_{\max_m} & t_{zO_m} & s_{zO_m} & rO_m \end{array} \right\}. \quad (8)$$

ZO характеризуется набором значений $zO_1 \dots zO_m$, по которым можно оценить возможность эффективного восстановления требуемых координат системы, а также соответствующим набором значений $zO_{\max_1} \dots zO_{\max_m}$, превышение которых в течение времени $t_{zO_1} \dots t_{zO_m}$ формирует событие потери рабочей области процедуры восстановления координат $s_{zO_1} \dots s_{zO_m}$. Это в свою очередь приводит к необходимости выбора нового компонента, более подходящего для текущего вектора состояния системы Z : $rO_i = f(s_{zO_1} \dots s_{zO_m})$, $s_{zO_i} = 1$ при $t_{(zoi > zoi_max)} > t_{zO_i}$, где rO – номер компонента, алгоритм которого лучше удовлетворяет сложившемуся сочетанию координат фазового пространства. Следует подчеркнуть, что следующий компонент (то есть управление) выбирается не только в функции событий времени, но и других событий системы. Аналогичным образом формируются области цели компонента и области ограничений на управление.

Также в состав компонента входит процедура восстановления координат и управления, которые обеспечивают требуемые количественные характеристики в области действия данного компонента.

Методика синтеза управления с использованием данных компонентов заключается в следующем:

1. Выбираются логические режимы работы электропривода, характерные и необходимые для достижения цели функционирования электропривода.
2. На основе выделенных логических режимов работы формируются компоненты, позволяющие достичь цели каждого из режимов.
3. В каждом компоненте количественно с помощью матрицы ZA определяется условие достижения цели работы компонента.

4. Для каждого компонента разрабатывается процедура управления, которая позволяет достигать требуемую область цели.
5. Для каждого компонента разрабатывается процедура восстановления координат, необходимых для управления и соблюдения ограничений. На этапе разработки в процессе тестирования процедуры выявляется ее рабочая область, в которой точность восстановления координат является удовлетворительной.
6. В каждом компоненте количественно с помощью матрицы ZO определяются рабочие области процедуры восстановления необходимых для управления координат.
7. В каждом компоненте количественно с помощью матрицы ZL определяются те рабочие области, в которых допускается управление применяемой процедурой управления с учетом ограничений на координаты системы.
8. Для ключевых событий компонента (достижения цели, выход за рабочую область наблюдения координат и т.д.) формируется номер того компонента, который позволяет наиболее эффективно решать задачи управления при текущем состоянии координат и событиях системы.

Разработанное по данной методике управление может быть представлено графически. На основании выделенных компонентов и условий переходов рисуется граф системы. В узлах графа показываются функции управления и восстановления координат, на ребрах – условия формирования событий переходов между узлами. Каждое ребро является однонаправленной стрелой, указывающее направление перехода для данного события. Предлагаемый алгоритм образует каркас управления системы, позволяющий выделить все логические состояния системы управления и соблюсти ограничения на работоспособность процедур. Каркас задает иерархию выполнения алгоритмов для последовательного достижения целей управления, и таким образом формирует последовательно-иерархическое управление электроприводом.

Предлагаемая методика позволяет использовать экспериментальные данные для управления и восстановления координат для определенного количества состояний объекта управления, то есть достижение целей управления становится возможным без наличия полного математического описания объекта управления.

Особенностью программного обеспечения является наличие двух высокоприоритетных приложений: управление инвертором (с заданной частотой) и обслуживание последовательного интерфейса (с требуемым временем реакции). Данные задачи обуславливают специфику построения остальных приложений микропроцессорной системы. Полученная при разработке электроприводов библиотека процедур, применяемых в составе программного обеспечения блоков управления, была классифицирована с целью выявления возможности обеспечения выполнения большого класса задач с разной периодичностью запуска в режиме работы в реальном времени. Был разработан планировщик задач, позволяющий обеспечивать

выполнение процедур в режиме реального времени, и предложена структура организации самих приложений.

На основании анализа основных способов реализации аппаратной части блоков управления электроприводами был сформирован шаблон мультизадачного приложения (рис.6). По составу в данном шаблоне применено избыточное количество процедур, что позволяет при создании нового устройства быстро разрабатывать программное обеспечение за счет удаления невостребованных задач. Структурой шаблона были определены основные потоки данных между задачами. Применение потоков позволяет заменять процедуры (с условием соблюдения единого интерфейса процедур) без радикальных изменений всего программного обеспечения и последующего тестирования.

Полученный шаблон был внедрен при разработке серий блоков управления электроприводами «БУР» и «ESD-V» (показаны на рис.3-4 в составе электроприводов арматуры, а также на рис.10).

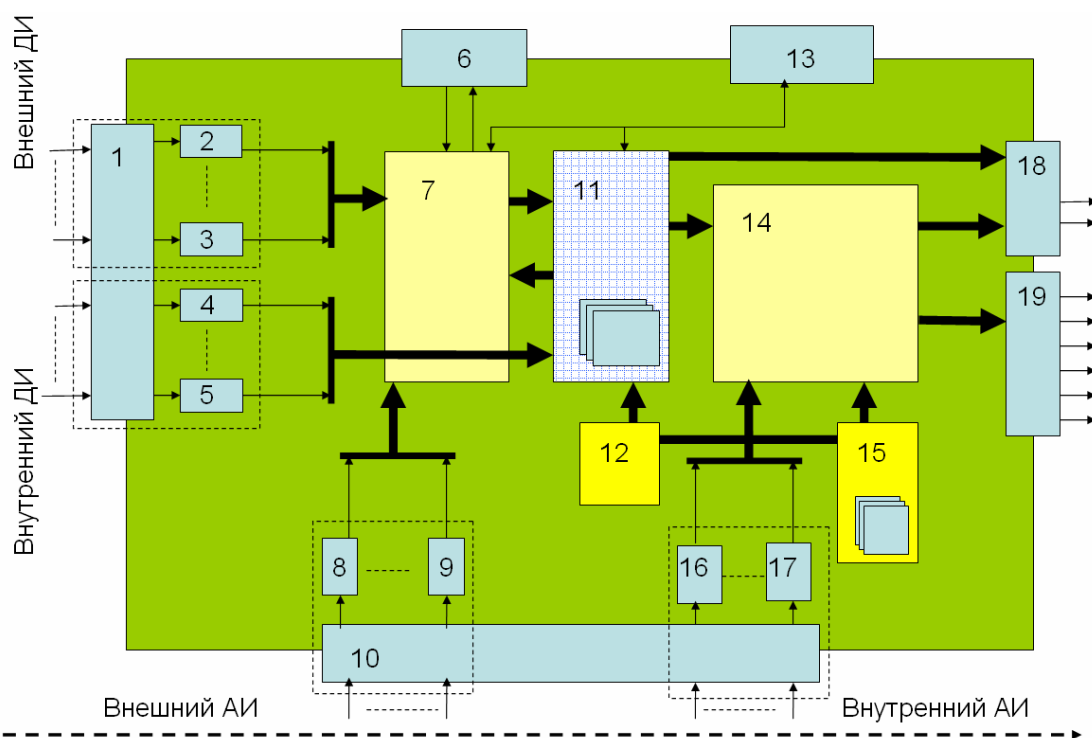
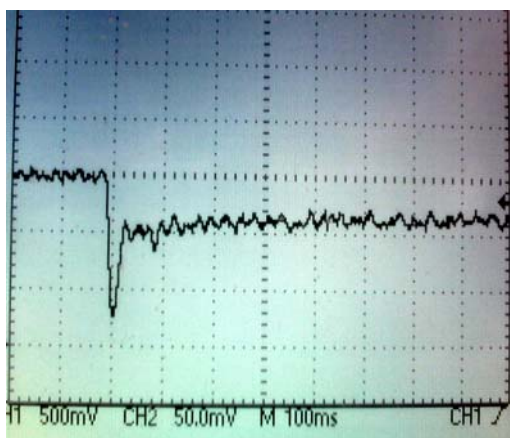


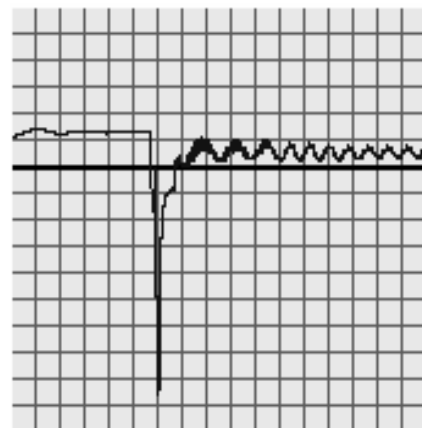
Рис.6. Шаблон мультизадачного приложения микропроцессорной системы управления (1 – драйверы дискретных интерфейсов (ДИ) управления, 2-5 – процедуры формирования событий, 6 и 13 – драйверы последовательных интерфейсов, 7 – модуль организации человеко-машинного интерфейса, 8-9,16-17 – процедуры фильтрации сигналов аналогового интерфейса (АИ), 10 – драйвер АИ, 11 – приложение формирования управления по компонентам, 12 и 15 – процедуры восстановления координат, 14 – модуль формирования управления на ключи преобразователя, 18-19 – драйвер выходного ДИ).

Третья глава посвящена разработке и исследованию модели электропривода запорной арматуры.

Модель асинхронного двигателя была построена в неподвижной относительно статора координатной системе a, b, c . При создании модели тиристорного регулятора было учтено отсутствие нулевого вывода в двигателе, что приводит к необходимости учета состояния нескольких тиристоров для определения условий открытия тиристора. При создании модели с преобразователем частоты учитывалось управление по закону широтно-импульсной модуляции, реализованной в применяемом DSP-контроллере. При моделировании процессов в микропроцессорной системе учитывалось применение только целочисленных значений и дискретность по времени при выдаче очередного управления на ключи.



а) эксперимент



б) моделирование

Рис. 7. Переходный процесс по моменту двигателя при изменении угла открытия тиристоров с $\alpha=0$ на $\alpha=100$ градусов для электропривода с тиристорным регулятором напряжения..

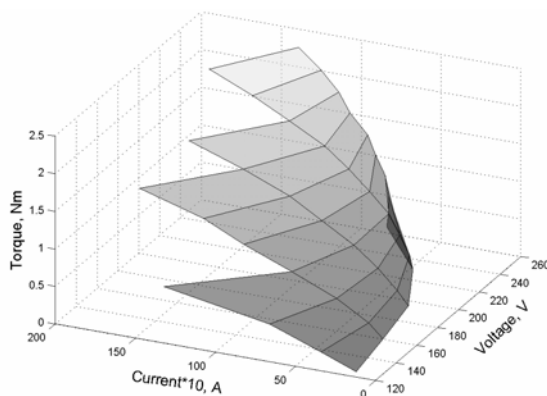
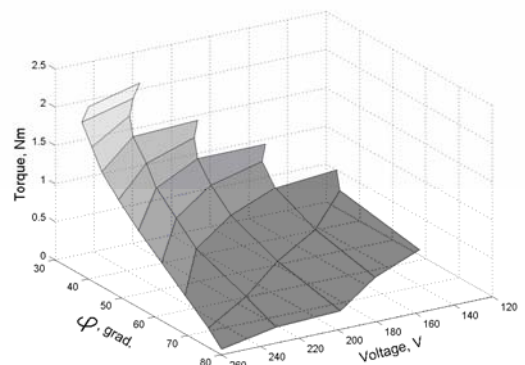
а) $M_{ЭП}=f(U, I)$ б) $M_{ЭП}=f(U, \varphi)$

Рис. 8. Зависимость момента электропривода $M_{ЭП}$ от тока I двигателя и напряжения сети U (а) и угла φ и напряжения (б). Здесь φ - угол между переходами через нулевое значение сигналов напряжения и тока.

При сравнении результатов, полученных на модели, с экспериментальными данными, наибольшее расхождение при выходе в статический режим составило 9%.

При моделировании работы системы ТРН-АД были выявлены области фазового пространства, в которых возможно формировать момент двигателя посредством изменения угла открытия тиристорov:

1. В режиме работы «на упор» (момент является функцией от угла открытия и напряжения сети).

2. При движении (нулевой угол открытия тиристорov обеспечивает отсутствие колебаний момента и скорости).

3. Импульс стартового момента при работе на упор (кратковременное открытие тиристорov с нулевым углом).

4. Импульс тормозного момента при движении (при ступенчатом уходе с нулевого угла открытия на угол в диапазоне 60-120 градусов).
Переходный процесс для данной ситуации представлен на рис.7.

Данные области были использованы при синтезе системы управления.

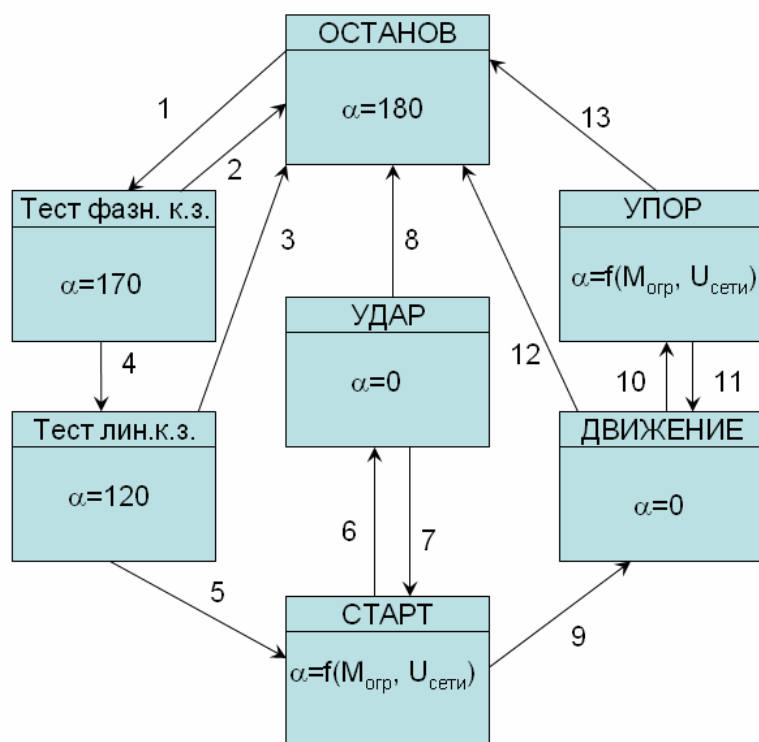
Табличные данные о статических значениях момента, полученные при моделировании и подтвержденные при эксперименте (с учетом свойств редуктора), были затем использованы как опорные точки процедуры интерполяции для расчета момента электропривода при движении (рис.8) и формировании упора.

В четвертой главе проведен синтез алгоритма управления, позволяющего достигать поставленные цели за счет смены компонентов при возникновении событий. Синтез был проведен для электропривода с тиристорным регулятором напряжения и преобразователем частоты.

При синтезе алгоритма управления для тиристорного регулятора напряжения ставились следующие цели:

1. Минимум времени тока короткого замыкания в нагрузке.
2. Работа на упор с заданным моментом.
3. Формирование импульса максимального момента в системе при невозможности начать движение.
4. Максимальная скорость вращения штока.

Синтез был проведен согласно методике, представленной во второй главе. В качестве исходных процедур восстановления момента движения и формирования момента упора электропривода (с учетом свойств волнового редуктора) использовалась процедура интерполяции полученных экспериментально точек. Были выделены компоненты, в которых указаны рабочие области процедур восстановления координат, целевые области, установлены переходы между компонентами при выходе параметров из допустимой зоны, введены свои функции формирования управления и вычисления момента. Граф работы полученного алгоритма представлен на рис. 9.



Обозначения событий на стрелках:

1. Команда на движение
2. Наличие фазного короткого замыкания
3. Наличие линейного короткого замыкания
4. Таймер теста фазного короткого замыкания
5. Таймер теста линейного короткого замыкания
6. Таймер отсутствия движения
7. Завершения работы процедуры ударного момента
8. Количество попыток приложения ударного момента равно нулю
9. Скорость двигателя больше половины номинальной
10. Превышение момента движения.
11. Скорость двигателя больше половины номинальной
12. Команда на останов, достижение целевого положения.
13. Таймер отсутствия движения

Рис.9. Граф работы системы управления электроприводом запорной арматуры с тиристорным регулятором.

Выполнение первой цели осуществляется за счет подачи предварительных тестовых импульсов с большими углами открытия (170 градусов для определение фазного к.з. и 120 градусов – для линейного к.з.). При прохождении теста происходит достижение второй цели – угол открытия тиристорov выставляется в соответствии с заданным моментограничением и напряжением сети. При отсутствии движения происходит передача управления компоненту «Удар», формирующего нулевой угол открытия с декрементом количества запуска компонента и последующими возвращением на прежний угол открытия тиристорov. При начале движения угол открытия тиристорov становится нулевым (компонент «Движение»), расчет момента осуществляется как табличная функция от напряжения сети, тока двигателя и коэффициента мощности. В случае превышения момента над заданным значением, происходит передача управления компоненту «Упор» со ступенчатой сменой угла открытия тиристорov, что приводит к снижению скорости, «расслаблению» редуктора и возможности управления по таблице, формирующей момент старта. Если движение не происходит в течение заданного времени, то момент нагрузки превышает сформированный момент двигателя, и происходит его отключение.

При синтезе управления электроприводом с преобразователем частоты ставились следующие цели:

1. Максимальная скорость, если текущая скорость вращения меньше установленного технологическими требованиями уровня.
2. Обеспечение достижения максимального циклового КПД в случае, если скорость вращения больше установленного технологическими требованиями уровня.

Были применены алгоритмы табличного расчета напряжения для формирования момента упора, расчет момента движения по дифференциальным уравнениям (рабочая область – не ниже 70% от номинальной скорости), алгоритмы поиска максимума производительности и циклового КПД за счет последовательной вариации амплитуды и частоты напряжения статора. Разработанный для преобразователя частоты алгоритм управления позволил обеспечить в электроприводе «Ангстрем-10000» с блоком «ESD-VC» перемещение штока на 50 оборотов за время 420 секунд с изменением момента от 14000 Нм до 2000Нм по нагрузочной диаграмме, характерной для шиберной задвижки. Мощность двигателя электропривода – 4 кВт, напряжение сети – номинальное. При снижении напряжения время отработки цикла электропривода уменьшалась пропорционально.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально исследована работа редуктора с промежуточными телами качения. Установлена зависимость коэффициента передачи по моменту редуктора от его режима работы и передаваемого момента.
2. Разработано микроконтроллерное управление электроприводом задвижки, позволяющее формировать требуемый момент для системы с тиристорным регулятором или обеспечивать максимальную производительность для системы с преобразователем частоты при выполнении ограничений, в том числе на рабочие области применяемых программных процедур управления и восстановления координат.
3. Разработано специализированное программное обеспечение для блоков управления электроприводами, обеспечивающее выполнение задач в реальном времени. Программное обеспечение было применено для однопроцессорных блоков управления электроприводами, в которых используется специализированный DSP-контроллер.
4. Разработаны программные продукты, позволяющие моделировать работу электропривода задвижки при различных эксплуатационных ситуациях.
5. Разработана методика синтеза алгоритма управления, позволяющая использовать экспериментальные данные для определенного количества состояний системы с последующей комбинацией переходов по

этим состояниям для достижения поставленной цели с учетом заданных ограничений.

6. Предложенные решения (рис.3,4,10) приняты промышленностью в серийное производство и в настоящее время эксплуатируются на нефте- и продуктопроводах России, замещая собой импортные электроприводы. Электроприводы с микропроцессорными блоками управления позволили значительно снизить издержки на эксплуатацию и повысить безопасность эксплуатации нефтепроводов.

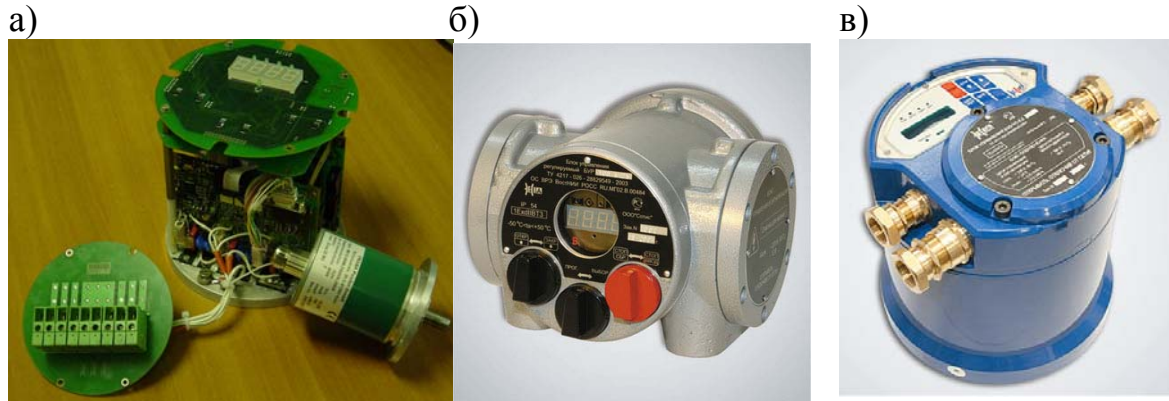


Рис.10. Микропроцессорный контроллер с тиристорным регулятором напряжения блока БУР (а), блок управления электроприводом запорной арматуры БУР (б), блок электронного управления ESD-VC (в)

Основное содержание диссертации опубликовано в 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. Микропроцессорный асинхронный электропривод с фазовым управлением // Труды III межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии» (АПТ-2002). Новоуральский государственный технический институт, Новоуральск – 2002. - С.146-149.
3. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С. Энергосберегающий цифровой асинхронный электропривод//«Современные средства и системы автоматизации – гарантия высокой эффективности производства» Материалы третьей научно-практической конференции (Томск, 14-15 ноября 2002 г.). Под ред. А.Г. Гарганеева. Изд-во Том. ун-та. - 2003.- С.193 -196.
4. 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.
5. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Нестеренко П.Г. Адаптивный цифровой электропривод запорно-регулирующей

арматуры//«Современные средства и системы автоматизации – гарантия высокой эффективности производства» Материалы третьей научно-практической конференции (Томск, 14-15 ноября 2002 г.). Под ред. А.Г. Гарганеева. Изд-во Том. ун-та. - 2003. - С.115-119.

6. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Саидов В.С., Черемисин В.Н. Интеллектуальные электроприводы запорно-регулирующей арматуры компании «ЭлеСи». // Труды 13 международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ – 05 (15-18 марта 2005). Екатеринбург. УГТУ-УПИ. – 2005 - С. 89, 90.

7. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Черемисин. Исследование основных режимов работы различных конструкций электроприводов запорно-регулирующей арматуры магистральных нефтепроводов// Материалы международной научно-технической конференции, «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы» 3-5 сентября 2003 г., Томск: ТПУ. - С. 26-30.

8. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Черемисин. Оптимальный алгоритм работы регулируемого электропривода запорной арматуры // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях. Труды Второй Всероссийской конференции. Новокузнецк, 18-20 мая 2004 г. Изд-во СибГИУ. - С. 40 – 42.

9. Антропов А.А., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Черемисин В.Н. Электромеханические системы запорно-регулирующей арматуры магистральных нефтепроводов// «Современные средства и системы автоматизации». Материалы четвертой научно-практической конференции (Томск, 21-23 октября 2003 г.). Изд-во Томского университета систем управления и радиоэлектроники. - 2004. - С. 63-67.

10. Антропов А.А., Антропов А.Т., Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Черемисин В.Н. Интеллектуальные электроприводы запорно-регулирующей арматуры// Труды 4 международной (15 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2004» (14-17 сентября 2004)/Под ред. С.В. Хватова. Магнитогорск., 2004. С. 347 -350.

11. Гарганеев А.Г., А.С. Каракулов, С.В. Ланграф, А.К. Поскребышев. Обеспечение энергетической эффективности электроприводов циклического действия//Известия ТПУ, №6. - 2005 г.- С.47-51.

12. Каракулов А.С. Повышение безопасности эксплуатации магистральных нефтепроводов за счет применения интеллектуальных электроприводов задвижек//«Современные средства и системы автоматизации – гарантия высокой эффективности производства» Материалы пятой научно-практической конференции (Томск, 21-22 октября 2004 г.). Изд-во Томского университета систем управления и радиоэлектроники.- 2004. - С. 51, 52.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Каракулов А.С., Саидов В.С., Черемисин В.Н. Электропривод установки композитных муфт на магистральный нефтепровод//«Современные средства и системы автоматизации – гарантия высокой эффективности производства» Материалы пятой научно-практической конференции (Томск, 21-22 октября 2004 г.). Изд-во Томского университета систем управления и радиоэлектроники. - 2004. - С.42, 43.

17. Разработка и изготовление опытного образца электропривода с крутящим моментом 1000-5000 Нм: Отчет о НИОКР (заключ.)/ЗАО «ЭлеСи»; Томский завод электроприводов. Руководитель работы А.Г. Гарганеев. № 01001/02-10, Инв. № 15674, 15676. Томск; 2002. 41 с. Соисполн.: А.С. Каракулов, А.А. Антропов, П.В. Нестеренко, В.В. Платонов.

18. Разработка и изготовление блоков управления электроприводов регулируемых с электронной муфтой ограничения крутящего момента для запорной арматуры с присоединительными местами типа «А» и «Г»: Отчет о НИОКР (заключ.)/ЗАО «ЭлеСи»; Томский завод электроприводов. Руководитель работы А.Г. Гарганеев. № 015024/03-15, Инв. № 21114. Томск; 2003. 63 с. Соисполн.: А.С. Каракулов, А.А. Антропов, П.В. Нестеренко, В.Н. Черемисин.

19. Разработка КД и ТД на электронный блок управления, изготовление опытного образца электронного блока с микропроцессорной системой управления и самодиагностики на взрывозащищенный электропривод для запорной и запорно-регулирующей арматуры Ду 500-1200 мм, Ру 1-8 мПа: Отчет о НИОКР (заключ.)/ЗАО «ЭлеСи»; Томский завод электроприводов. Руководитель работы А.Г. Гарганеев. № 01502/02-10, Инв. № 16997, 16998. Томск; 2002. 43 с. Соисполн.: А.С. Каракулов, А.А. Антропов, П.В. Нестеренко, В.В. Платонов.

20. Электропривод. Патент № 36478. Россия. /Брезгин А.Е., Каракулов А.С., Черемисин В.Н., Антропов А.А. Пр. от 22.10.2003.