

На правах рукописи



Смирнов Александр Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ НИЗКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2011

Работа выполнена на кафедре электропривода и электрооборудования ФГБОУ
ВПО Национального исследовательского Томского политехнического
университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Букреев Виктор Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Казанцев Юрий Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Орлов Юрий Александрович

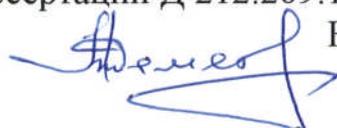
Ведущее предприятие: Обособленное подразделение «Научно-
исследовательский институт автоматики и
электромеханики Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится 16.12.2011 года в 15:00 часов на заседании совета по
защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО
НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ
по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «11» ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д 212.269.11,
к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Системы управления электроприводов (ЭП) в настоящее время обеспечивают бесперебойную и надёжную работу механизмов во многих областях техники. Функциональные возможности современных ЭП во многом определяются характеристиками применяемых систем управления, а также параметрами силовой части.

Наибольшее распространение получил асинхронный ЭП с микропроцессорным управляющим устройством, позволяющим организовать регулирование выходных переменных в широком диапазоне, с высоким быстродействием и точностью. Существенный вклад в создание и развитие теории ЭП переменного тока внесли 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. Чижено, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, Эпштейн И.И., G. Schroder, F. Blaschke, J. Holtz, W. Leonard, T.A. Lipo, D.W. Novotny и др.

Актуальной на сегодняшний день является задача повышения работоспособности асинхронного ЭП запорной трубопроводной арматуры (ЗТА) с целью достижения эксплуатационных характеристик при низких температурах окружающей среды. Определяющее влияние на работоспособность электроприводов ЗТА оказывают низкие температуры (-50...-60°C), особенно в период запуска агрегатов после длительной остановки.

Жесткие условия эксплуатации редуктора и задвижки запорной арматуры определяют необходимость использования адаптивных алгоритмов управления, позволяющих в реальном времени минимизировать влияние возмущений в электроприводе и повысить его работоспособность.

Кроме того, для обеспечения требуемых показателей качества регулирования необходимо не только учитывать изменение параметров редуктора и асинхронного двигателя, но и уменьшить количество отказов элементов системы управления ЭПЗТА при низких температурах окружающей среды.

Объектом исследования является асинхронный электропривод с редуктором волнового типа, работающий в широком диапазоне температур окружающей среды.

Предметом исследования является алгоритмическое обеспечение микропроцессорных регуляторов асинхронного электропривода запорной арматуры, функционирующего в условиях значительного изменения температуры окружающей среды.

Целью диссертационной работы является повышение работоспособности частотно-регулируемого электропривода запорной арматуры при низких температурах окружающей среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ особенностей работы запорной арматуры и выделить требования, предъявляемые к асинхронному электроприводу и его нагрузочным характеристикам.

2. Уточнить математическую и имитационную модели асинхронного электродвигателя и редуктора электропривода запорной трубопроводной арматуры с учетом влияния температуры окружающей среды.

3. Разработать адаптивный регулятор тока системы управления электропривода, позволяющий сформировать требуемый электромагнитный момент асинхронного двигателя с учетом механических потерь в волновом редукторе и температуры окружающей среды.

4. Модифицировать программное обеспечение для организации микроконтроллерного управления асинхронным электроприводом при создании необходимого электромагнитного момента в функции от температуры окружающей среды.

5. Исследовать статические и динамические характеристики электропривода запорной арматуры с учетом изменения температуры окружающей среды на имитационных моделях и экспериментальном стенде.

Методы исследования. При решении поставленных задач были использованы: теория электропривода и электрических машин, теория автоматического управления, численное моделирование, а также экспериментальные исследования. Имитационное моделирование осуществлялось в среде MATLAB 6.5, программирование – на языке С.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность научных выводов и результатов подтверждается моделированием на основе современных программных продуктов, количественным и качественным соответствием теоретических и экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм коррекции параметров регулятора скорости и тока электропривода запорной арматуры, учитывающий влияние температуры окружающей среды на активное сопротивление обмотки ротора и позволяющий обеспечить требуемые показатели качества перемещения задвижки.

2. Создан алгоритм сигнальной адаптации задания электромагнитного момента асинхронного двигателя, учитывающий изменение механических потерь в редукторе электропривода запорной арматуры и низких температурах окружающей среды.

3. Предложено корректирующее устройство и методика выбора его параметров, обеспечивающее уменьшение уровня вибраций в механической части задвижки путем формирования дополнительной составляющей задания электромагнитного момента асинхронного электропривода запорной арматуры.

Практическая ценность диссертационной работы:

1. Разработана программа расчета параметров регуляторов тока и скорости асинхронного электропривода запорной арматуры с учетом влияния температуры окружающей среды.

2. Разработана программа расчета значений сигнальной адаптации электромагнитного момента и параметров корректирующего устройства электропривода запорной арматуры с учетом влияния температуры окружающей среды.

3. Разработана программа расчета корректирующих значений электромагнитного момента асинхронного двигателя с учетом изменения механических потерь в редукторе электропривода запорной арматуры и температуры окружающей среды в реальном времени на базе микропроцессора TMS320.

Результаты работы использованы на предприятии ООО НПО «СибМаш», (г. Томск) при создании промышленно выпускаемого асинхронного электропривода марки «ГУСАР», а именно создании дополнительного программного алгоритма коррекции в программное обеспечение для микроконтроллерной системы управления ЭП, которое позволяет поддерживать постоянным выходное значение момента в зависимости от изменения температуры окружающей среды в диапазоне от +20 до -60°C.

На защиту выносятся:

1. Алгоритм коррекции и программа расчета параметров регуляторов скорости и тока асинхронного двигателя, учитывающие влияние температуры окружающей среды на активное сопротивление обмотки ротора, позволяющие обеспечить требуемые показатели качества перемещения рабочего органа трубопроводной арматуры.

2. Алгоритм и программа расчета сигнальной адаптации для задания электромагнитного момента асинхронного двигателя, учитывающие изменение механических потерь в редукторе трубопроводной арматуры и температуры окружающей среды.

3. Вариант корректирующего устройства в виде апериодического звена и его программная реализация для формирования дополнительной составляющей задания электромагнитного момента асинхронного двигателя, что позволяет уменьшить вибрации в механической части электропривода трубопроводной арматуры.

4. Программа расчета характеристик асинхронного электропривода с учетом изменения температуры окружающей среды, позволяющая произвести расчет параметров основных элементов асинхронного электропривода и обеспечить требуемые показатели качества перемещения рабочего органа трубопроводной арматуры.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках следующих конференций и семинаров: X Международной научно-технической конференции «Решетневские чтения», посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, г.

Красноярск / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, Красноярск, 2006; Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск: ТПУ, 2007; VII Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск: ТПУ, 2007; серии Международных научно-практических конференций студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», СТТ, ТПУ, г. Томск, 2006-2011; научно-технических семинарах кафедры электропривода и электрооборудования ЭНИН ТПУ, Томск, 2009 – 2011.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в семи публикациях, в том числе двух статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, двух свидетельствах об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 139 страниц, включая 60 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 83 наименований и приложение из 46 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ области исследований, рассмотрены особенности эксплуатации асинхронных электроприводов запорной арматуры и конструкции задвижек магистральных нефтепроводов, работающих в диапазоне температур от +20 до –60 °С.

Определены такие основные требования к запорной трубопроводной арматуре магистральных трубопроводов, как минимальное гидравлическое сопротивление полностью открытой арматуры; легкость срабатывания после длительной эксплуатации в открытом положении; высокая надежность; долговечность; безотказность; герметичность затвора и всех уплотнений; коррозионная стойкость. Кроме того, значения точности регулирования электромагнитного момента и быстродействие электропривода запорной арматуры в температурном диапазоне от +20 до –60 °С должны соответствовать ГОСТ-51137-98.

В работе определены критерии работоспособности ЭПЗТА, которые включают требования к регулируемым переменным электропривода, безотказности системы управления ЭП, износостойкости составных элементов редуктора и рабочего органа ЗТА.

При низких температурах окружающей среды наиболее интенсивным видом разрушения элементов конструкции ЗТА является износ, поэтому необходимо искать пути повышения долговечности деталей, работающих в условиях этого вида изнашивания.

В таблице 1 приведены основные качественные показатели некоторых электроприводов, работающих при низких температурах окружающей среды

(ООО НПО «СибМаш» (г. Томск), AUMA (Германия), ТЭП (г. Тула), ROTORK (Германия)).

Таблица 1. Основные характеристики некоторых электроприводов

марки ЭП	«ГУСАР» (СибМаш)	«AUMA» (AUMA)	«ТЭП» (ТЭП)	«ROTORK» (ROTORK)
показатели				
время разгона, с	3	5	12	7
точность, %	5	10	20	10
диапазон регулирования, Гц	10÷50	10÷50	10÷50	10÷50
температурный диапазон работы, °С	от -50 до +50	от -40 до +70	от -45 до +50	от -40 до +70

Проведенные исследования показали, что электропривод «ГУСАР» производства ООО НПО «СибМаш» обладает более лучшими характеристиками в отличие от электроприводов фирм AUMA, ТЭП и ROTORK. Также установлены особенности работы ЭП запорной арматуры при низких температурах, которые характеризуются существенным изменением механических свойств материалов. Для учета влияния низких температур внешней среды на параметры электропривода запорной арматуры необходимо разработать уточненные модели асинхронного двигателя и волнового редуктора при изменении температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и провести дополнительные экспериментальные исследования.

Во второй главе производится расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя электропривода, математическое моделирование АД с учетом эффекта вытеснения токов в стержнях ротора и расчет кривой потерь, возникающих в механической части ЭП при изменении температуры окружающей среды. Для большинства случаев приемлемыми являются методы определения параметров АД на основании его справочных данных.

При расчете электромеханических и механических характеристик АД целесообразно воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее удобной для оценки влияния изменений параметров асинхронного двигателя на его характеристики является Т-образная схема замещения (рис. 2).

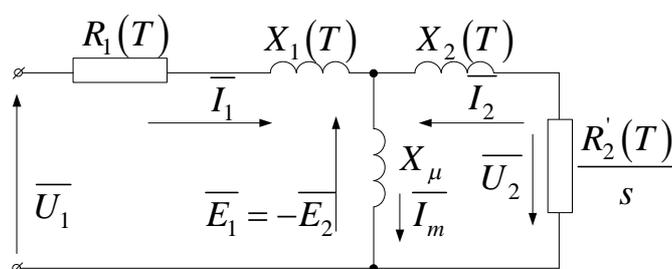


Рис.2. Т-образная схема замещения АД

Основные уравнения АД, соответствующие принятой схеме замещения, с параметрами, зависящими от температуры T окружающей среды:

$$\bar{U}_1 - \bar{E}_1 - j X_1(T) \bar{I}_1 - R_1(T) \bar{I}_1 = 0 \quad (1)$$

$$\bar{E}_1 + j X_2'(T) \bar{I}_2' + R_2'(T) \bar{I}_2' / s = 0 \quad (2)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0, \quad (3)$$

где \bar{U}_1 – вектор фазного напряжения; s – номинальное скольжение; \bar{I}_1 – вектор тока обмотки статора двигателя при частичной нагрузке; \bar{I}_2' – вектор тока обмотки ротора двигателя при частичной нагрузке; $R_1(T)$ – активное сопротивление обмотки статора; $R_2'(T)$ – активное сопротивление обмотки ротора; \bar{I}_0 – вектор тока холостого хода АД; $X_1(T)$ – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки; $X_2(T)$ – индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки; $\bar{E}_1 = -\bar{E}_2$ – Э.Д.С. ветви намагничивания, созданная магнитным потоком в воздушном зазоре обмоткой статора.

В уравнениях (1) и (2) присутствуют параметры, которые изменяющиеся от температуры, а именно R_2' , X_1 , X_2 . В диссертации получена зависимость активного сопротивления роторной обмотки АД от частоты и температуры окружающей среды (рис. 3).

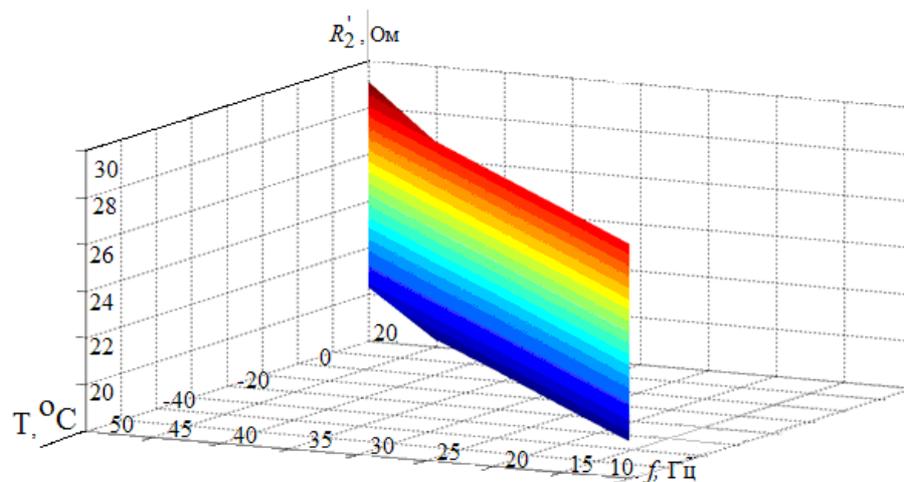


Рис. 3. Зависимость изменения активных сопротивлений статора и ротора от температуры окружающей среды и изменением частоты вращения АД
(■ - +20 °С, ■ - 0 °С, ■ - -20 °С, ■ - -60 °С)

При моделировании было выяснено, что эффект вытеснения токов в стержнях ротора в большей степени проявляется на частоте вращения АД, равной 50 Гц. При уменьшении частоты вращения двигателя влияние данного эффекта на характеристики АД во всем диапазоне изменения температуры окружающей среды возможно не учитывать.

Для математического описания АД в неподвижной системе координат, можно использовать систему уравнений (4) с параметрами, функционально зависящими от температуры окружающей среды.

$$\begin{cases}
\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{l_e} \left(u_{s\alpha} - R_e(T) i_{s\alpha} + K_r(T) a_r(T) \psi_{r\alpha} + K_r(T) \omega_r \psi_{r\beta} \right) \\
\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{l_e} \left(u_{s\beta} - R_e(T) i_{s\beta} + K_r(T) a_r(T) \psi_{r\beta} - K_r(T) \omega_r \psi_{r\alpha} \right) \\
\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = R_2'(T) K_r(T) i_{s\alpha} - a_r(T) \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \\
\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = R_2'(T) K_r(T) i_{s\beta} - a_r(T) \psi_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} \\
M = k_m (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \\
\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{\text{нагр}})
\end{cases} \quad (4)$$

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, $R_e(T)$ – эквивалентное сопротивление обмотки ротора АД в функции от температуры T окружающей среды; $a_r(T)$, $K_r(T)$, $k_m(T)$ – коэффициенты, характеризующие параметры АД при изменении температуры T окружающей среды, J – приведенный динамический момент инерции на валу АД, ω_r – частота вращения вала двигателя, M – электромагнитный момент двигателя, $M_{\text{нагр}}$ – статический момент механической нагрузки.

На основе системы уравнений (4) создана имитационная модель АД с корректировкой его параметров и учетом температуры окружающей среды (выделенные блоки на рис. 4). В работе также исследована имитационная модель АД во вращающейся системе координат. Данная модель необходима для проведения синтеза оптимальных регуляторов тока и скорости системы управления АД.

Результаты моделирования в виде графиков переходных процессов сгруппированы отдельно для скорости и момента асинхронного электродвигателя (рис. 5, 6).

По результатам моделирования была проведена проверка адекватности реального АД и компьютерной модели (рис. 7), которая показала, что в результате проведения теоретических и экспериментальных исследований время переходных процессов уменьшается при снижении температуры (таблица 2).

Таблица 2. Время переходного процесса при пуске АД в зависимости от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	20	0	-20	-40	-60
$t_{\text{ПП}}, \text{с}$	0,432	0,409	0,388	0,386	0,355
$M_{\text{уст}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	1,59				

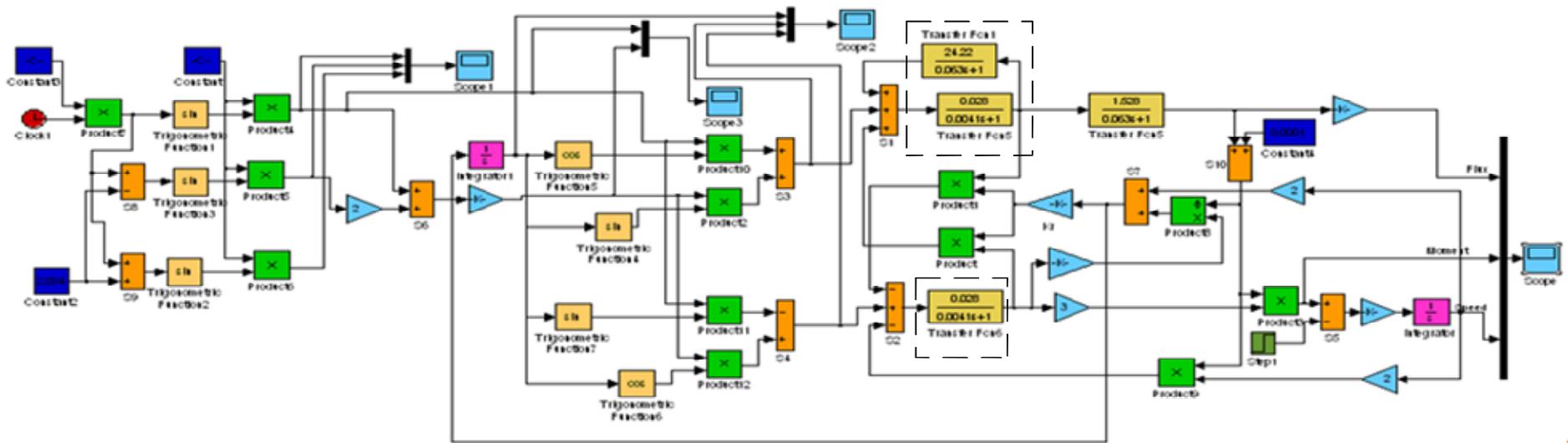


Рис. 4. Имитационная модель АД

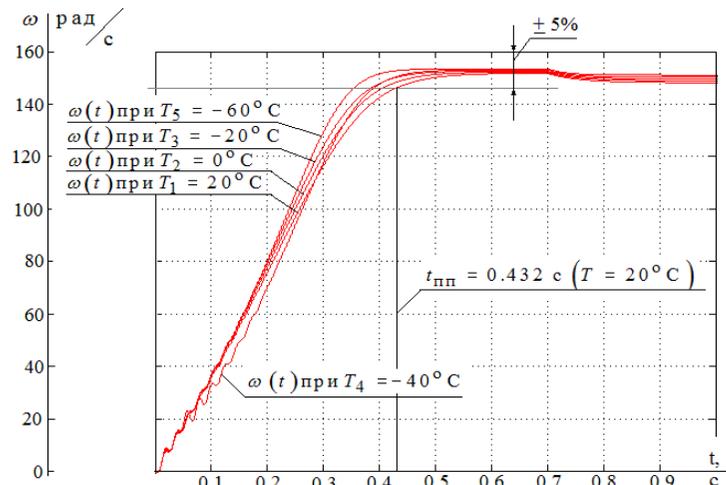


Рис. 5. Переходный процесс по скорости при пуске и набросе нагрузки АД при снижении температуры окружающей среды

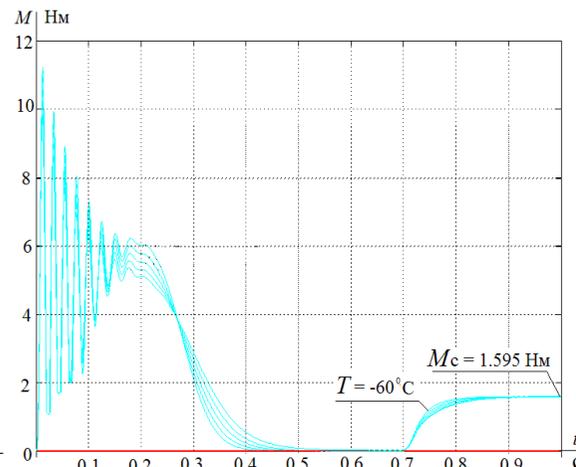


Рис. 6. Переходный процесс по моменту при пуске и набросе нагрузки АД при снижении температуры окружающей среды

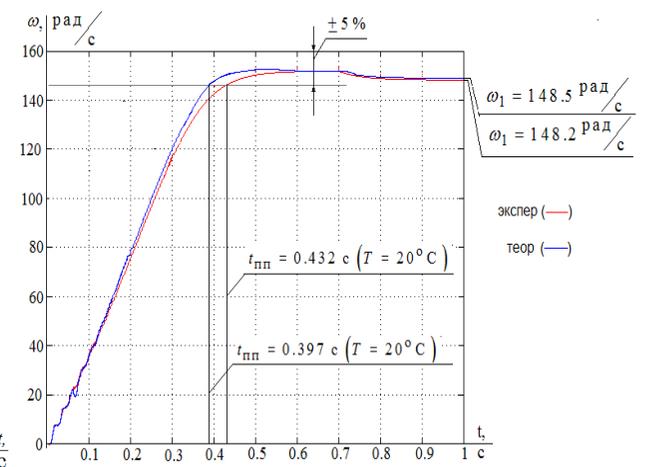


Рис. 7. Переходный процесс скорости при пуске и набросе нагрузки АД (теоретическая и экспериментальная кривые)

Это происходит благодаря увеличению момента, развиваемого на валу АД в результате уменьшения активного сопротивления ротора.

В электроприводе «ГУСАР» механическим преобразователем является редуктор волнового типа. В волновом редукторе имеется смазка, которая обеспечивает уменьшение механических потерь, а также долговечность его работы, что в конечном итоге влияет на работоспособность асинхронного электропривода трубопроводной арматуры.

От качества смазки зависит момент холостого хода редуктора и электропривода при различных температурах. При использовании традиционной смазки момент холостого хода составляет 1,4 Н·м, в тоже время смазка типа ВНИИНП-286М ТУ38-101950 позволяет добиться момента холостого хода, равного 1,1 Н·м, что отражается на нагрузочной характеристике. В этом случае разброс нагрузочных характеристик при номинальной частоте вращения составляет 1,7 Н·м, при использовании же традиционных смазок данный разброс увеличивается примерно в 2 раза.

Кроме того, при работе асинхронного электропривода, в составе которого имеется волновой редуктор, возможен «обратный ход» рабочего органа трубопроводной арматуры в момент останова электропривода в одном из крайних положений задвижки. При использовании разработанного звена коррекции и фильтра на выходе регулятора скорости, который в свою очередь отвечает за формирование моментной характеристики асинхронного двигателя электропривода, количество циклов «обратного хода» сводится к минимуму.

В диссертации приведен расчет момента сопротивления волнового редуктора с учетом низких температур и эффекта «обратного хода» редуктора. Зависимость момента редуктора от электромагнитного момента асинхронного двигателя имеет нелинейный характер и зону нечувствительности (рис. 8).

Нагрузочную характеристику электропривода целесообразно определять на основе механических потерь в волновом редукторе. В качестве исходной информации используется зависимость механических потерь в редукторе от электромагнитного момента двигателя, полученная экспериментальным путем в температурном диапазоне от +20 до -60 °С (рис. 9). На основе интервально-линейной аппроксимации экспериментальной зависимости (рис. 8, рис. 9) записывается уравнение вида:

$$M_{редi}(M_{adi}) = \frac{(M_{ред1} - M_{ред2})(M_{редi} - M_{ред2})}{M_{ад1} - M_{ад2}} + M_{ред2} \quad (5)$$

где M_{adi} – i -е значение момента асинхронного двигателя $M_{ад}$; $M_{редi}$ – i -е значение момента механических потерь в редукторе волнового типа; $M_{ад1}$, $M_{ад2}$, $M_{ред1}$, $M_{ред2}$ – соответственно, интервальные значения электромагнитного момента асинхронного двигателя и момента потерь в редукторе.

Третья глава посвящена вопросам синтеза структуры и определения параметров регуляторов тока и скорости системы управления асинхронным ЭП.

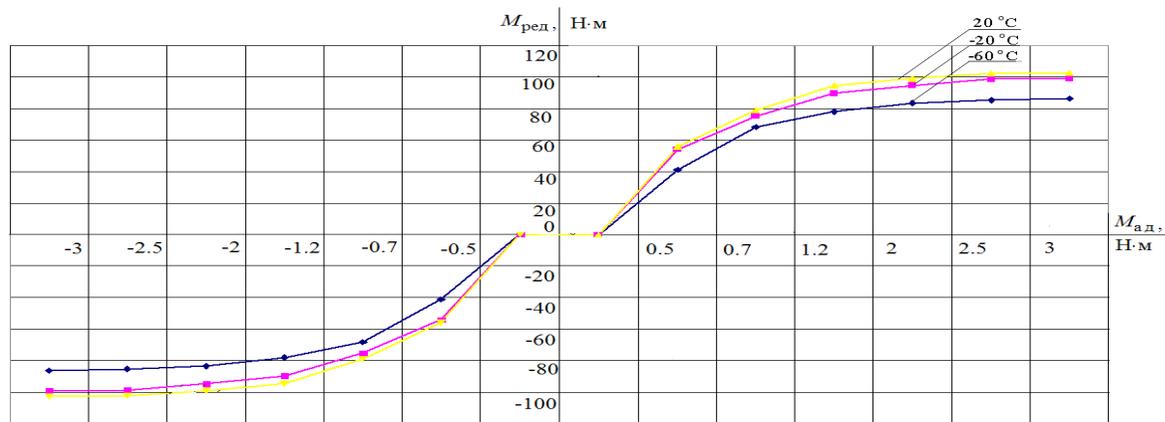


Рис. 8. Зависимость $M_{редуктор} = f(M_{АД})$ при изменении температуры окружающей среды

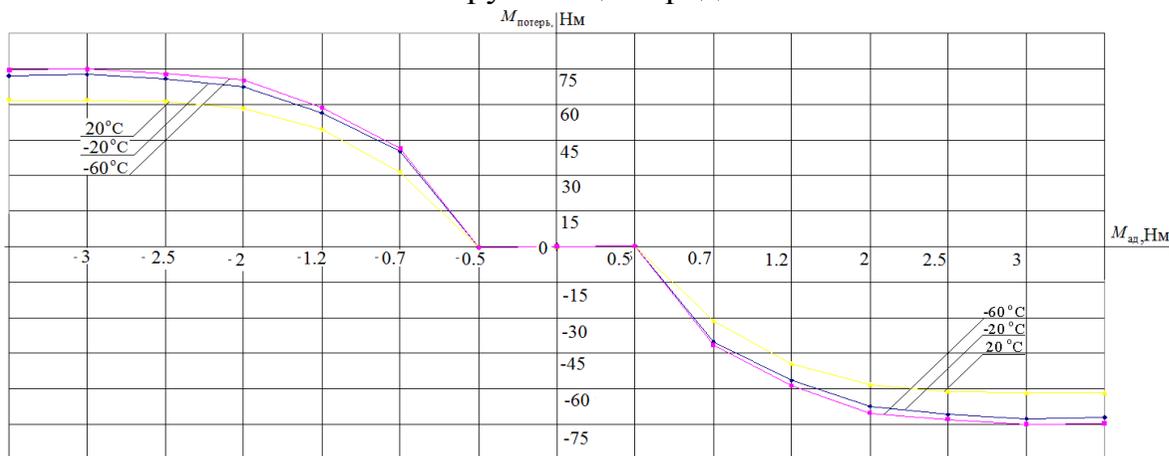


Рис. 9. Кривые потерь, возникающие в волновом редукторе при изменении температуры окружающей среды $M_{потерь} = f(M_{АД})$

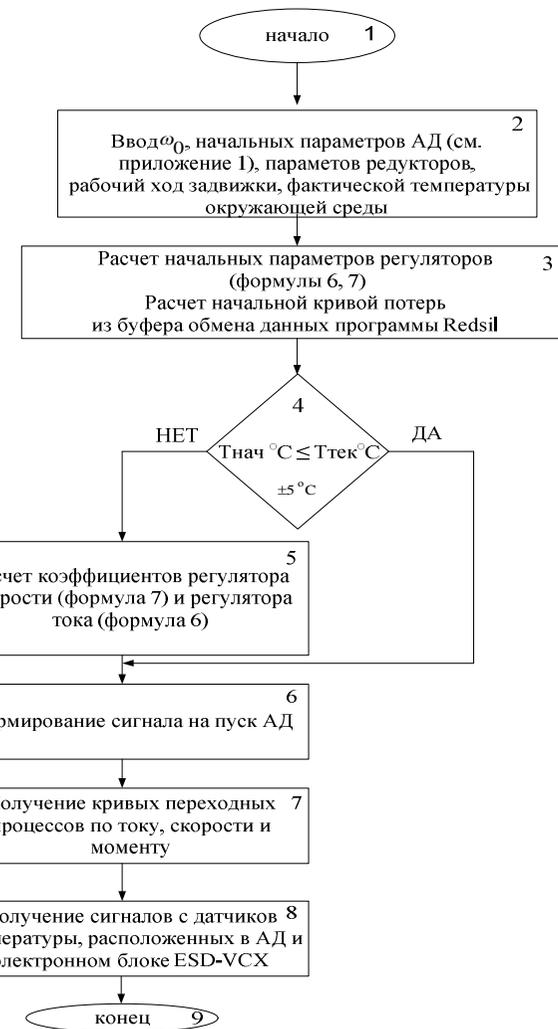


Рис. 11. Алгоритм коррекции параметров регулятора скорости и тока электропривода, учитывающий влияние температуры окружающей среды на активное сопротивление обмотки ротора

При синтезе регуляторов используется метод определения желаемой передаточной функции электропривода с настройкой на модульный оптимум. Для контуров управления скорости движения и положением задвижки с целью минимизации ошибки по возмущению использована настройка на симметричный оптимум. Функциональная блок-схема системы управления асинхронным электроприводом «ГУСАР» представлена на рис. 10.

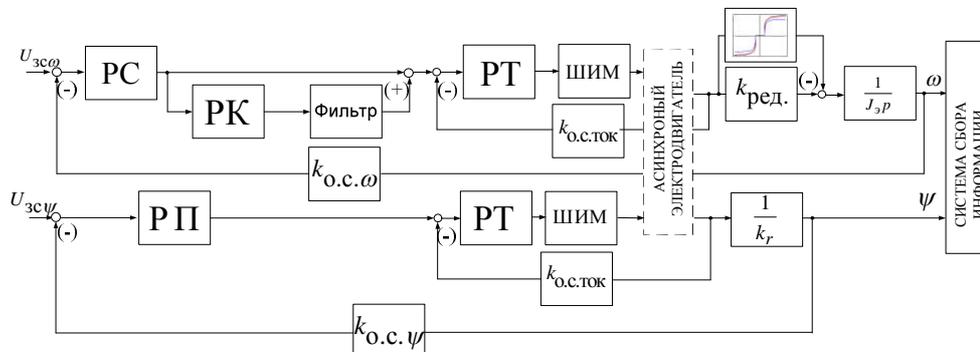


Рис. 10. Функциональная блок-схема системы управления асинхронным электроприводом «ГУСАР»

На рис. 10 приняты следующие обозначения: РС – регулятор скорости; РК – регулятор коррекции; РТ – регулятор тока; РП – регулятор потокосцепления; $k_{ред}$ – коэффициент передачи редуктора; $k_{о.с.ω}$ – коэффициент обратной связи по скорости; $k_{о.с.ψ}$ – коэффициент обратной связи по потокосцеплению; $k_{о.с.ток}$ – коэффициент обратной связи по току; K_r – коэффициент усиления, характеризующий увеличение сопротивления фазы ротора двигателя под влиянием эффекта вытеснения тока; $J_э$ – эквивалентный момент инерции механизма.

Для стабилизации момента на валу электродвигателя в температурном диапазоне от +20 до -60 °С в систему управления электропривода вводится звено, которое производит коррекцию токовой составляющей значения электромагнитного момента. Данная корректировка осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 11.

Для построения регулятора тока используется следующая методика:

1. Производится расчет активного сопротивления $R_2'(f, T)$ ротора, который зависит от частоты и температуры окружающей среды, а также определяется коэффициент $k_{РТ}$ усиления регулятора тока по формуле:

$$k_{РТ} = \frac{R_1 + R_2'(f, T) K_r^2}{2}.$$

2. Формируется массив данных $k_{РТ}$ с учетом изменения температуры окружающей среды, а также частоты вращения АД (рис.12).

Данная зависимость формируется в виде базы данных, позволяющая автоматически подстраивать регулятор тока системы управления

электропривода таким образом, чтобы поддерживать значение электромагнитного момента постоянным в температурном диапазоне от +20 °С до -60 °С с заданным быстродействием и высокой точностью.

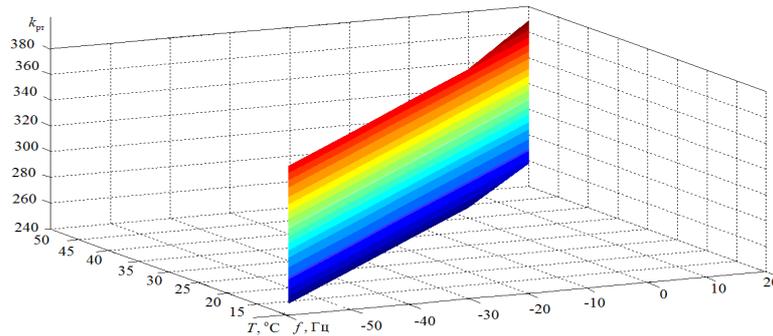


Рис. 12. Зависимость изменения $k_{РТ}$ от температуры окружающей среды (■ - +20 °С, ■ - 0 °С, ■ - -20 °С, ■ - -60 °С) и изменения частоты вращения АД асинхронного электропривода «ГУСАР»

После уточнения имитационной модели АД выполняется процедура оптимизации системы управления ЭП, которая состоит из регуляторов тока, скорости и потокосцепления.

Регулятор тока настраивается на модульный оптимум:

$$W_{РТ}(p) = k_{РТ} \frac{T_{РТ} p + 1}{T_{РТ} p}, \quad (6)$$

где $T_{РТ} = T_{ИНВ} = \frac{1}{f_{ИНВ}} = \frac{1}{5000} = 0.0002$, с - постоянная времени регулятора тока;

$f_{ИНВ}$ - частота ШИМ процессора в преобразователе частоты.

Регулятор скорости, в состав которого входит звено коррекции, настраивается на симметричный оптимум. С учетом параметров контура скорости выбирается ПИ – регулятор с передаточной функцией:

$$W_{РС}(p) = k_{РС} \frac{T_{РС} p + 1}{T_{РС} p}, \quad (7)$$

где $U_{ЗС} = 10$ В; $a_c = 2, b_c = 2$ – коэффициенты оптимизации контура скорости; $T_{РС} = 16 T_{\muТ} = 16 \cdot 0,0002 = 0,0032$ с – малая постоянная времени контура скорости.

Блок-схема корректирующего звена представлена на рис. 13. Данное звено корректирует выходной сигнал с регулятора скорости, который в свою очередь формирует момент на выходном валу электродвигателя. Количество циклов алгоритма работы корректирующего звена зависит от скорости изменения параметров электропривода, которые функционально зависят от температуры окружающей среды и частоты вращения АД (рис. 14). Посредством данного звена, момент на выходном валу АД поддерживается постоянным во всем диапазоне частот (от 10 до 50 Гц) вращения двигателя и температуры (от +20 до -60 °С).

Низкочастотный фильтр на выходе звена коррекции, позволяет уменьшить колебания момента на выходном валу двигателя (с 0,9 до 0,05 Н·м), (см. рис. 15), что в свою очередь снижает вибрации в редукторе, обеспечивая более плавную и стабильную работу электропривода во всем диапазоне частот (от 10 до 50 Гц) и температур (от +20 до -60 °С). Значение постоянной времени фильтра определяется по результатам численного эксперимента, при котором достигается минимальный уровень колебаний электромагнитного момента.

С помощью метода наименьших квадратов в программе Excel была выявлена аппроксимационная зависимость постоянной времени фильтра от уровня колебаний электромагнитного момента, представленная на рис. 16 и выраженная в виде функции:

$$\Delta M = -0,0002T_{\phi}^5 + 0,0054T_{\phi}^4 - 0,0523T_{\phi}^3 + 0,2221T_{\phi}^2 - 0,5858T_{\phi} + 0,0519, \quad (8)$$

где ΔM , Н·м - амплитуда колебаний электромагнитного момента; T_{ϕ} , с - постоянная времени фильтра на выходе регулятора скорости.

Экспериментально установлено (рис. 16), что диапазон выбора значений постоянной времени фильтра равен $(49 \div 65)T_k$, при этом временной диапазон определяется интервалом от 0,99 до 1,25 с, где T_k - период колебаний электромагнитного момента.

Результаты моделирования асинхронного электропривода в виде переходных процессов частоты вращения и электромагнитного момента АД представлены на рис. 17–19.

Анализ переходных процессов скорости и момента электропривода, полученных теоретическим и экспериментальным путем, показывает, что они практически не отличаются друг от друга и составляет не более 5 %.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет корректировать выходное значение моментной составляющей в регуляторе скорости. В результате увеличивается точность позиционирования на 80 %.

Сравнительная оценка показателей качества электропривода «ГУСАР» серийного исполнения и электропривода с модифицированной системой управления приведена в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительная оценка показателей качества

показатель	«ГУСАР»	«ГУСАР» с коррекцией
быстродействие, с	0.06496	0.05
точность позиционирования, %	10	2

Предложенный в работе алгоритм коррекции и программа расчета параметров регуляторов скорости и тока асинхронного электропривода, которые позволяют учитывать влияние температуры окружающей среды на активное сопротивление обмотки ротора, позволяют обеспечить требуемые показатели качества перемещения рабочего органа трубопроводной арматуры, а именно увеличить быстродействие электропривода на 24 % и точность позиционирования задвижки на 80 %.

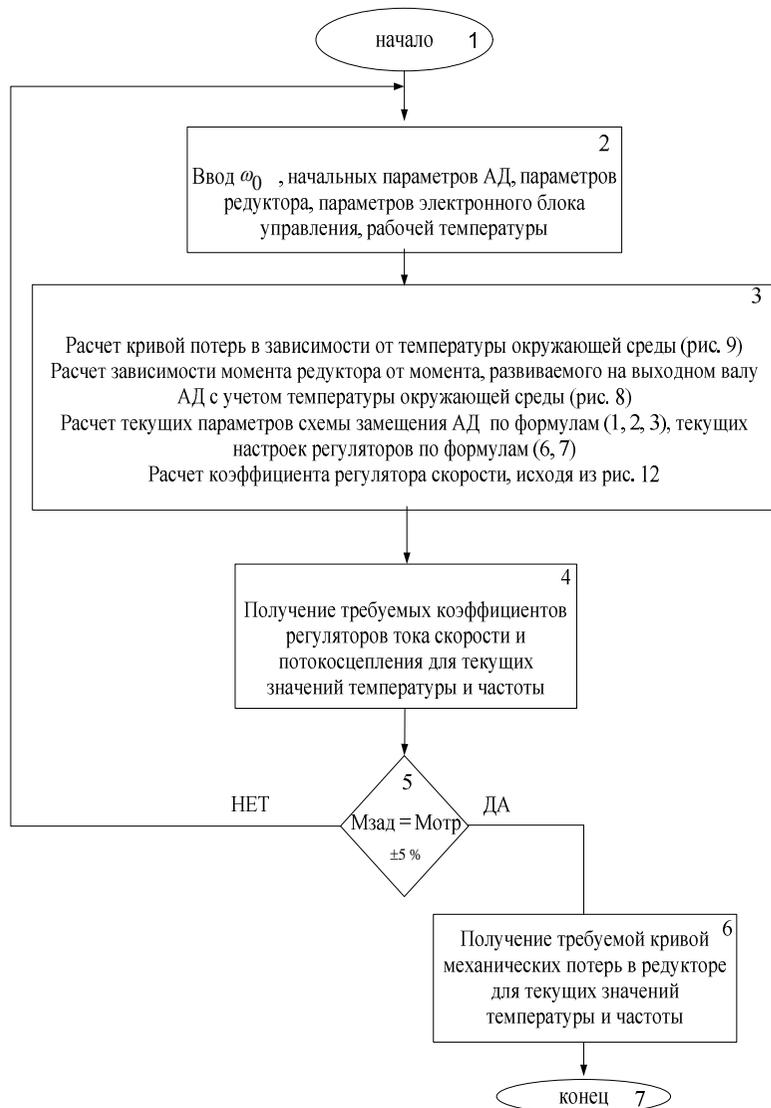


Рис. 14. Алгоритм работы сигнальной адаптации задания электромагнитного момента АД, учитывающий изменение механических потерь в редукторе ЗТА

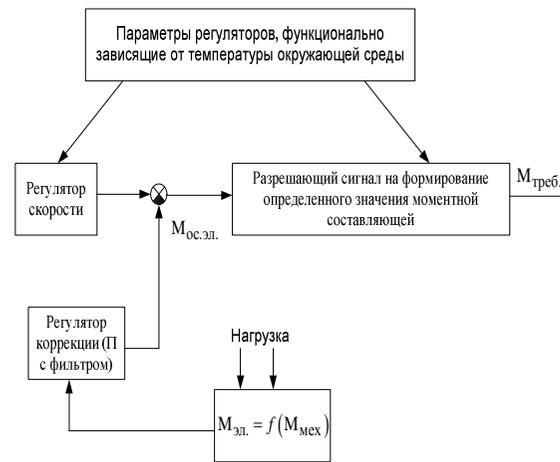


Рис. 13. Блок-схема звена коррекции

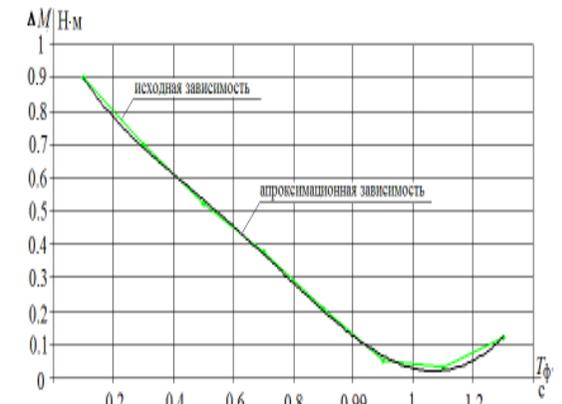


Рис. 16. Зависимость колебаний момента от малой постоянной времени фильтра на выходном валу электродвигателя

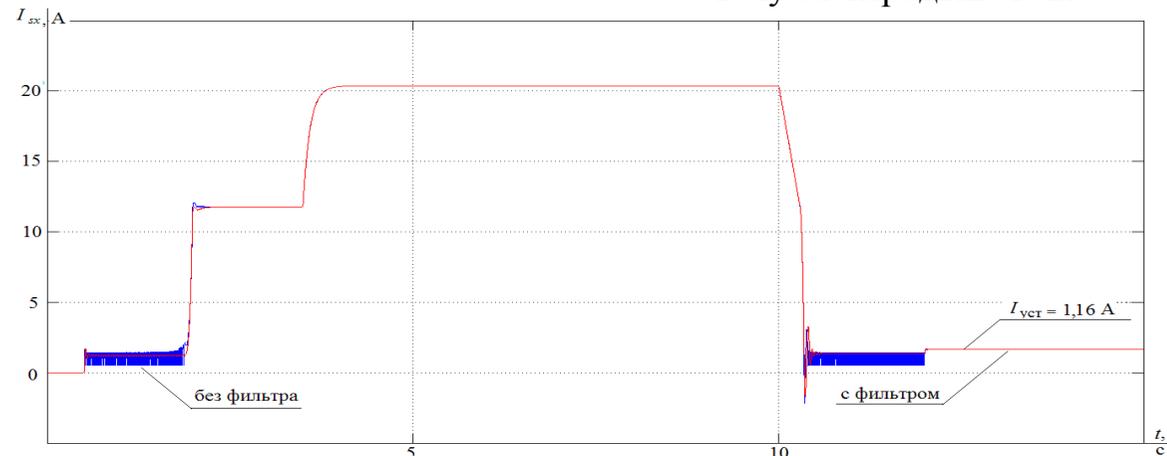


Рис. 15. Выходной сигнал с регулятора скорости, имеющий звено коррекции без фильтра на выходе регулятора

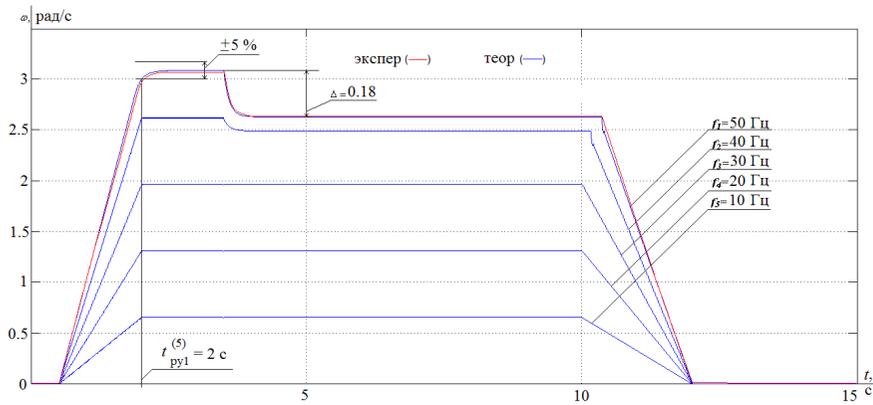


Рис. 17. Переходный процесс по скорости электропривода при пуске на холостом ходу, последующем набросе нагрузки полной остановки в диапазоне частот от 10 до 50 Гц, при разных значениях температур (от +20°C до -60°C)

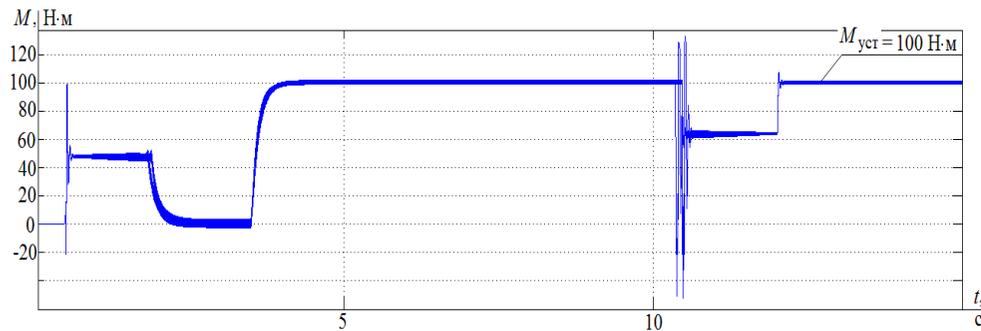


Рис. 18. Переходные процессы по моменту в редукторе и электропривода при разных значениях температур (от +20°C до -60°C)

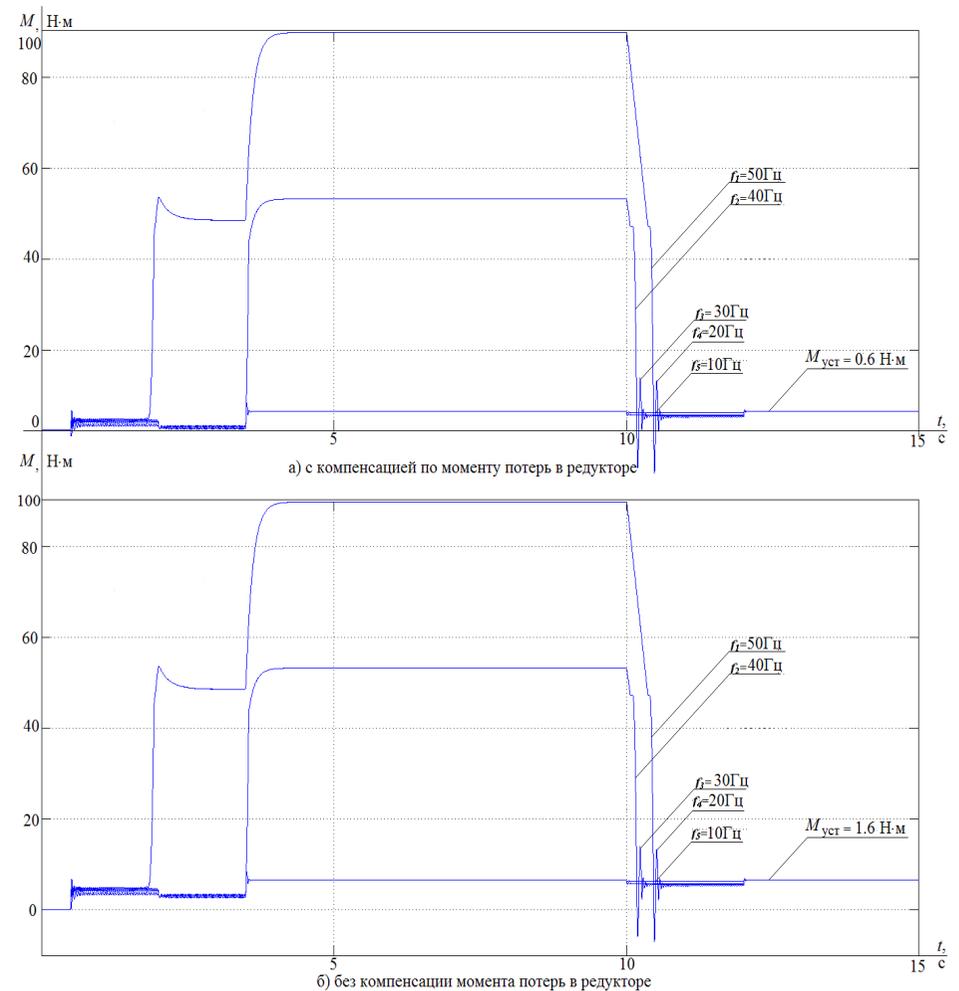


Рис.19. Переходные процессы по моменту на выходе регулятора скорости а) с компенсацией по моменту потерь в редукторе, б) без компенсации по моменту потерь в редукторе электропривода «ГУСАР» при пуске на холостом ходу, последующем набросе нагрузки полной остановки в диапазоне частот от 10 до 50 Гц, при разных значениях температур (от +20°C до -60°C)

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования работы асинхронного ЭП. На рис. 20 представлено фото экспериментальной установки.



Рис. 20. Общий вид экспериментальной установки



Рис. 21. Электропривод «ГУСАР» на испытательном стенде

В климатическую камеру «Фэйтрон» для охлаждения до заданной температуры помещаются компоненты электропривода ESD-VCX: электронный блок управления АД в сборе с волновым редуктором. В климатической камере имеется датчик, с помощью которого контролируется температура внутри камеры. После охлаждения до заданной температуры электронный блок управления подключается к питающей сети через интерфейс, который соединен с персональным компьютером. При достижении заданной температуры двигатель вместе с редуктором устанавливается на нагрузочный стенд (см. рис. 21). На нагрузочном стенде формируется момент сопротивления, который прикладывается к выходному валу редуктора, а на индикаторе датчика момента фиксируется его текущее значение. При различных значениях температуры обеспечивается изменение нагрузочного момента с регистрацией частоты вращения и тока асинхронного двигателя. Таким образом, для значений температуры в диапазоне от +20 до -60 °С фиксируются переходные процессы в диапазоне частот от 10 до 50 Гц по моменту и скорости АД при пуске на холостом ходу, набросе нагрузки и полной остановке электропривода. При использовании звена коррекции видно, что асинхронный электропривод работает устойчиво во всем заданном температурном диапазоне (рис. 22).



Рис. 22. Переходные процессы по моменту и скорости АД в диапазоне частот от 10 до 50 Гц, при разных значениях температур (от +20 до -60 °С)

Анализ экспериментальных и расчетных графиков переходных процессов (рис. 22) показал, что стабилизация момента электродвигателя и частоты вращения АД происходит за счет непрерывного поддержания постоянной кривой механических потерь при изменении коэффициентов регуляторов тока и скорости в системе управления ЭПЗА в режиме реального времени при изменении температуры от +20 до -60 °С.

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 6.5, методика расчета схемы замещения асинхронного электропривода, методика расчета параметров системы управления, свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Созданы алгоритм коррекции и программа расчета параметров регуляторов скорости и тока асинхронного электропривода, которые позволяют учитывать влияние температуры окружающей среды на активное сопротивление обмотки ротора двигателя, обеспечить требуемые показатели качества перемещения рабочего органа трубопроводной арматуры, а именно: уменьшить время переходного процесса по скорости на 24 % и увеличить точность позиционирования на 80 %.

2. Разработаны алгоритм и программа расчета сигнальной адаптации задания электромагнитного момента асинхронного двигателя, которые позволяют учитывать изменение механических потерь в волновом редукторе трубопроводной арматуры и температуры окружающей среды в реальном времени на базе микропроцессора TMS320.

3. Предложенный вариант корректирующего устройства в виде апериодического звена позволяет сформировать дополнительную составляющую задания электромагнитного момента асинхронного двигателя, уменьшающую амплитуду вибраций в механической части электропривода трубопроводной арматуры на 5,6 %.

4. Разработана программа расчета величины дополнительного задания электромагнитного момента электропривода с учетом изменения механических потерь в редукторе и температуры окружающей среды в реальном времени на базе контроллера TMS320, которая позволяет учитывать механические потери, возникающие в редукторе, и при этом автоматически подстраивать систему управления для получения необходимого сигнала на формирование требуемого момента в режиме реального времени.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Бекишев Р.Ф., Ланграф С.В., Казаков В.С., Смирнов А.О. Исследование статических режимов работы частотно–управляемого асинхронного электропривода в условиях низких температур // Журнал «Известия ТПУ». – Томск: ТПУ, 2009. – Т. 315. – №4. - С. 61-64.

2. Бекишев Р.Ф., Ланграф С.В., Казаков В.С., Смирнов А.О. Исследование динамических режимов работы частотно–управляемого асинхронного электропривода в условиях низких температур // Журнал «Известия ТПУ». – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 319. – №4. - С. 107-110.

3. Смирнов А.О. Имитационная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе преобразователя частоты фирмы Danfoss // Решетневские чтения. Материалы X Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (8-10 нояб. 2006, г. Красноярск) / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т – Красноярск, 2006. - С. 270-271.

4. Смирнов А.О. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод на базе преобразователей частоты фирм АВВ и Danfoss. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной научно-технической конференции, 5-8 июня 2007 г. - Томск: ТПУ, 2007. - С. 96-98.

5. Смирнов А.О. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод на базе преобразователей частоты фирм АВВ. // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы VII Международной научно-технической конференции, 3-6 июня 2008. - Томск: ТПУ, 2007. - С. 113-116.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009614898. Программа расчета характеристик асинхронного электродвигателя с учетом изменения температуры окружающей среды; автор Смирнов А.О., правообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет, заявл. 17.07.2009 г., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 08.09.2009 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617327. Программа расчета характеристик асинхронного электропривода с учетом изменения температуры окружающей среды; автор Смирнов А.О., правообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет, заявл. 10.09.2010 г., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.11.2010 г.

Личный вклад автора. В публикациях [1], [2] автору принадлежит разработка математической модели асинхронного электропривода с учетом влияния температуры окружающей среды (40 %). Остальные публикации выполнены без соавторов.