

На правах рукописи



СИНЮКОВА Татьяна Викторовна

СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
С КОРРЕКТИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И
ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ

Специальность: 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электропривода» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ЛГТУ»)

Научный руководитель:

Мещеряков Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривода» ФГБОУ ВПО «ЛГТУ»

Официальные оппоненты:

Козярук Анатолий Евтихиевич, доктор технических наук, профессор, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», заведующий кафедрой электротехники, электроэнергетики, электромеханики

Кузнецов Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», доцент кафедры систем автоматического управления

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Защита состоится «28» октября 2015 г. на заседании диссертационного совета Д 212.238.05. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан «06» июля 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05
кандидат технических наук



М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность темы исследования определяется растущим спросом на экономичные, простые в изготовлении, дешевые в обслуживании системы электропривода, предназначенные для использования на объектах общепромышленного назначения, таких как конвейеры, механизмы перемещения грузов. Перспективными являются системы электропривода на базе асинхронного двигателя, обеспечивающие реализацию энергосберегающего режима. Достижение энергосбережения в асинхронном электроприводе является важным направлением исследования. Существует несколько способов реализации энергосберегающего режима в асинхронном электроприводе: поддержанием постоянства $\cos \varphi_1$; поддержанием постоянного скольжения; управлением с использованием модели двигателя; с помощью поисковых алгоритмов. Системы управления электроприводом постоянно совершенствуются за счет применения новых алгоритмов и современной элементной базы, что ведет к повышению работоспособности электропривода. Так, в скалярной системе с блоком коррекции напряжения минимизируется ток статора при заданном моменте двигателя, при этом для определения корректирующего сигнала используются значения легко измеряемых параметров. Использование в устройствах управления электроприводами с прямым управлением моментом (ПУМ) надежных и не зависящих от особенностей определенного объекта управления поисковых алгоритмов ведет к обеспечению энергосберегающих режимов и достижению большого быстродействия по моменту.

Цель работы. Совершенствование систем асинхронного электропривода с частотным управлением, предназначенных для конвейеров и механизмов перемещения грузов, путём разработки и применения новых схемных решений и алгоритмов управления, позволяющих осуществлять оптимальное энергопотребление.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие задачи

1. Разработка системы скалярного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, с применением системы коррекции напряжения, производящей выработку корректирующего сигнала в функции тангенса угла между векторами тока и эдс статора;

2. Разработка и исследование однокритериальной оптимизации на базе нечеткой логики системы частотного регулирования асинхронным электроприводом с прямым управлением моментом;

3. Разработка и исследование двухкритериальной оптимизации на базе нечеткой логики системы частотного управления асинхронным электроприводом с прямым управлением моментом;

4. Разработка и исследование блока для обеспечения автоматического контролируемого режима форсировки задания на формирование потокосцепления статора;

5. Обучение поискового алгоритма на базе нечеткой логики для прямого управления моментом частотного асинхронного электропривода.

Объектом исследования являются системы асинхронного электропривода, предназначенные для объектов общепромышленного назначения.

Методы исследования. В работе использовались методы структурных преобразований теории автоматического управления, методы математического моделирования нелинейных динамических систем на цифровых вычислительных машинах с использованием численных методов решения, методы экспериментального подтверждения, методы нечеткой логики, обучения, дифференциальные и интегральные исчисления.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Системы скалярного управления асинхронным двигателем с блоком коррекции напряжения: в функции угла между векторами тока и эдс статора, в функции абсолютного скольжения;
2. Алгоритмы прямого управления моментом (ПУМ) асинхронного двигателя с однокритериальной и двухкритериальной оптимизацией на базе нечеткой логики;
3. Система ПУМ асинхронного двигателя с фаззи-регулятором;
4. Система ПУМ асинхронного двигателя с измененным алгоритмом переключения силовых элементов инвертора.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны новые системы коррекции закона частотного управления, отличающиеся тем, что сигнал коррекции напряжения определяется на основании расчета угла между моментобразующими векторами переменных асинхронного двигателя;
2. Разработана система прямого управления моментом с нечетким регулятором, отличающаяся обеспечением минимизации тока статора при заданном статическом моменте за счет стабилизации угла между векторами тока статора и потокосцепления статора при изменении параметров двигателя;
3. Разработаны системы прямого управления моментом асинхронного двигателя и их компьютерные модели, отличающиеся наличием фаззи-регулятора и измененного алгоритма переключения силовых ключей инвертора, способствующих сокращению времени между циклическими опросами в поисковых методах;
4. Разработан поисковый алгоритм для системы автоматического управления асинхронным двигателем с нечетким регулятором, отличающийся уменьшенным циклом работы, обеспечивающий оптимальный режим частотного управления асинхронным двигателем и повышенным быстродействием при формировании оптимального угла между векторами тока статора и потокосцепления статора.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные системы с коррекцией напряжения, вырабатывающие корректирующий сигнал в функции тангенса угла между векторами тока и эдс статора и в функции абсолютного скольжения, встраиваются в типовые схемные решения, повышают работоспособность системы управления электроприводом механизмов промышленного назначения;
2. Предложено новое энергосберегающее техническое решение, заме-

няющее существующую типовую систему управления, представляющее собой систему частотного асинхронного электропривода, выполненную на базе нечеткой логики с применением поисковых алгоритмов, использующих при расчете только значения токов и напряжений;

3. Разработан алгоритм двухкритериальной оптимизации и блоки, дающие возможность увеличить быстродействие системы, позволяющие обеспечить энергосберегающий режим работы асинхронного двигателя.

Реализация результатов работы

Результаты исследования использованы в учебном процессе в ФГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет».

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00205А «Разработка и исследование энергосберегающих электромеханических систем прямого и обратного преобразования электрической и механической энергии с асинхронными машинами, математическое моделирование и оптимизация режимов их работы».

Достоверность полученных результатов

Подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории электропривода.

Личный вклад автора. В работе автором лично получены следующие результаты: синтезированы блоки коррекции напряжения систем скалярного управления; созданы блоки оптимального управления на базе нечеткого поискового регулятора; создан блок автоматического формирования задания потокосцепления с форсировкой; разработан измененный алгоритм переключения силовых элементов инвертора; найдена зависимость между контролируемым параметром, током статора и управляющим воздействием, углом между моментобразующими векторами.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции «Современные сложные системы управления X HTCS», Старый Оскол, 2012 г.; IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами», Липецк, 21-24 мая 2012 г.; VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2-4 октября 2012 г.; Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика», ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2013 г.; XIV Международной научно-технической конференции: «Информационные системы и технологии» ИСТ-2012, Нижний Новгород, 2013 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и автоматика», ЛГТУ, Липецк, 1-4 июля 2014 г.; Современная металлургия начала нового тысячелетия. К 80-летию НЛМК (Программа «Кадры для регионов»): сборник научных трудов международной научно-практической конференции 17-21 ноября 2014 г.; XXI Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015, Нижний Новгород, 2015 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, из них 4 статьи, 2 из которых – в журнале из перечня ВАК, 17 тезисов докладов на конференциях, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, библиографического списка, приложений. Общий объём диссертации - 166 страниц машинописного текста, включая 90 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 109 наименований, 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе произведен анализ систем частотного асинхронного электропривода, обеспечивающих управление моментом двигателя.

Системы управления электроприводом постоянно совершенствуются, что ведет к упрощению систем и повышению работоспособности электропривода. Электромагнитный момент является основной величиной, характеризующей процесс получения механической энергии из электрической. Существует несколько способов определения электромагнитного момента. Если основой системы управления является схема замещения, то для нахождения электромагнитного момента пользуются величинами, лежащими в ее описании. Представление электромагнитного момента двигателя через проекции пространственных векторов токов и потокосцеплений во вращающейся системе координат используется при описании электромагнитных процессов в пространственных векторах.

В последнее время разработано много систем скалярного частотного управления асинхронным двигателем с блоками коррекции законов частотного управления. В основном недостатками данных систем является сложность управления моментом двигателя. Векторное управление, в основе которого лежит представление о напряжениях, токах и потокосцеплениях как о пространственных векторах, за счет обеспечения поддержания точности момента во всем диапазоне регулирования скорости выгодно отличается от скалярного управления. Прямое управление моментом, являющееся разновидностью векторной системы управления, обеспечивает быстроту реакции электромагнитного момента двигателя на управляющее воздействие. Применение в системах прямого управления моментов аппаратов нечеткой логики позволяет добиться лучшего управления процессом, данные системы могут использоваться на конвейерах, а также на механизмах общепромышленного назначения, в частности в электроприводах механизмов передвижения подъемно-транспортного оборудования

Во второй главе рассмотрены системы скалярного управления асинхронным двигателем с блоками коррекции напряжения. Приведено математическое описание систем скалярного управления, векторного управления и прямого управления моментом.

В настоящее время для управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором также часто применяются системы частотного электропривода со скалярным управлением. Предлагаемая система управления электроприводом переменного тока, представленная на рисунке 1 а), типовая схема частотного скалярного управления дополнена блоками 10-13 векторной коррекции закона управления. Инвертор 1 через датчики 2,3 питает статорные обмотки асинхронного двигателя 4 широтно-модулируемыми пульсациями силового напря-

жения, поступающего с выхода блока 5. Блок 6 вырабатывает сигналы задания на напряжение. Блок задания сигналов управления 7 вырабатывает сигнал задания на частоту и на амплитуду напряжения в переходных режимах, в соответствии с законом частотного управления $U_1^* = f(\omega_1^*)$. При изменении нагрузки или осуществлении регулирования частоты вращения, для обеспечения минимального значения тока статора при заданном значении статического момента на валу двигателя необходимо изменять амплитуду напряжения U_1^* так, чтобы угол между векторами тока статора и тока намагничивания φ_0 (рисунок 1, б) был близок к 45° , при данном условии угол θ^* между векторами тока статора и эдс статора также будет стремиться к 45° , тогда $\text{tg}\theta^* = 1$. На основании векторной диаграммы (рисунок 1, б) можно определить тангенс угла между векторами тока и эдс статора. В блоке 10 осуществляется расчет тангенса угла между векторами тока статора и эдс. В результате выполненных исследований было установлено, что корректирующий скалярный сигнал напряжения ΔU можно формировать в виде интегральной функции от ранее определенного сигнала $\Delta \text{tg}\theta$

$$\Delta U = \int_0^{t_{\text{кон}}} \alpha \cdot U_{1\text{н}} \cdot \Delta \text{tg}\theta \cdot dt,$$

где $t_{\text{кон}}$ – конечное время работы электропривода; $U_{1\text{н}}$ – номинальное фазное напряжение статора; α – нормирующий коэффициент, который при исследовании электропривода на компьютерной модели принимается: $0,01 < \alpha < 0,1$.

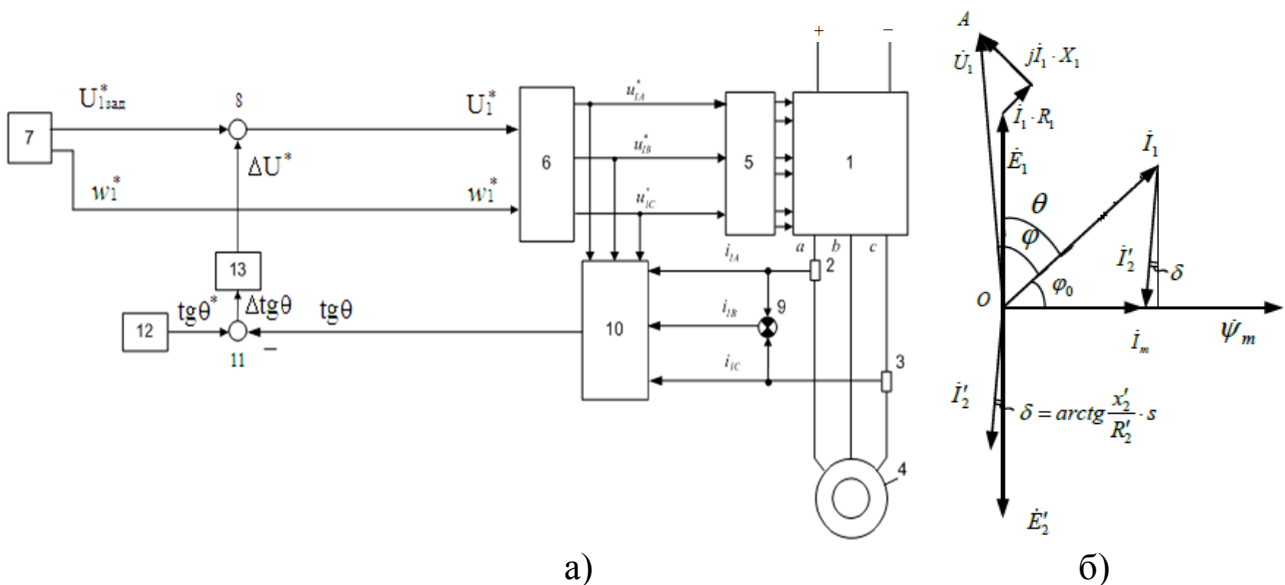


Рисунок 1 – а) устройство с блоком коррекции системы автоматического управления короткозамкнутым асинхронным двигателем;

б) векторная диаграмма

В результате выполненных исследований установлено, что система коррекции напряжения позволяет уменьшить ток статора до 6 % при пониженных показателях по отношению к номинальным значениям статического момента, что обеспечивает улучшение энергетических показателей, однако блок коррекции не обеспечивает стабилизацию момента двигателя в пусковом режиме и практически не влияет на характер переходных процессов при пуске электро-

привода.

Принцип коррекции закона частотного управления может быть реализован в электроприводе, построенном на базе асинхронного двигателя с фазным ротором [3]. В этом случае для измерения доступны переменные в обмотке ротора, это позволяет построить блок коррекции напряжения, в котором сигнал вносимой поправки определяется в функции от частоты тока ротора. Данная система скалярного управления с коррекцией напряжения позволяет вносить поправку в закон частотного регулирования, однако корректирующий блок имеет сложный алгоритм управления.

Наиболее качественное управление моментом асинхронного двигателя обеспечивают системы с прямым управлением моментом с использованием адаптивных регуляторов.

В третьей главе разработаны и исследованы системы с однокритериальной и многокритериальной оптимизацией на базе нечеткой логики, обеспечивающие оптимальный режим работы асинхронного электропривода. Произведено моделирование векторной системы управления, моделирование систем с прямым управлением моментом.

Оптимизация, реализуемая на базе нечеткой логики с применением поисковых алгоритмов, выполняющих коррекцию управляющего воздействия в небольших пределах, является надежным и не зависящим от свойств конкретного объекта управления способом реализации энергосберегающего режима в асинхронном электроприводе. Оптимальный режим работы достигается путем минимизации потребляемой мощности: $P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$. Одним из видов оптимизации является оптимизация по минимуму тока. Одним из наиболее простых алгоритмов, реализуемых в системах векторного управления, является поддержание оптимального угла φ_1 между моментобразующими векторами (рисунок 2, а)). Из проведенных исследований было выявлено, что оптимальным углом по условию минимума тока статора является угол $\varphi_1 \approx 40^\circ$, а по условию минимума потерь $\varphi_1 \approx 35^\circ$. Входными задающими параметрами для ПУМ (рисунок 2, б)) являются момент двигателя M_d^* и модуль потокосцепления статора $|\psi_1^*| = \frac{2}{3p_n \sin \varphi_1} \frac{M_d^*}{|I_1|}$, угол φ_1 был принят

равным оптимальному значению. Полученное уравнение не зависит от активных изменяющихся параметров двигателя. Поэтому не требуется перенастройка блока оптимизации потока в зависимости от насыщения или вследствие нагрева АД. Тем не менее угол по минимуму потерь учитывал только потери на активных сопротивлениях элементов цепи, без учета потерь в стали, и значение угла было получено приблизительно с погрешностью $\pm 2^\circ$. Поэтому блоку оптимизации требуется коррекция выходного значения по углу с помощью поисковых алгоритмов. Используемый поисковый регулятор был создан на базе нечеткой логики, в качестве входных сигналов отклонения за единицу времени тока статора I_1 и угла между векторами тока статора и потокосцепления статора φ_1 . Структурная схема блока оптимизации приведена на рисунке 3. Основная часть блока реализует функцию поддержания угла φ_1 как в статических, так и в динамических режимах.

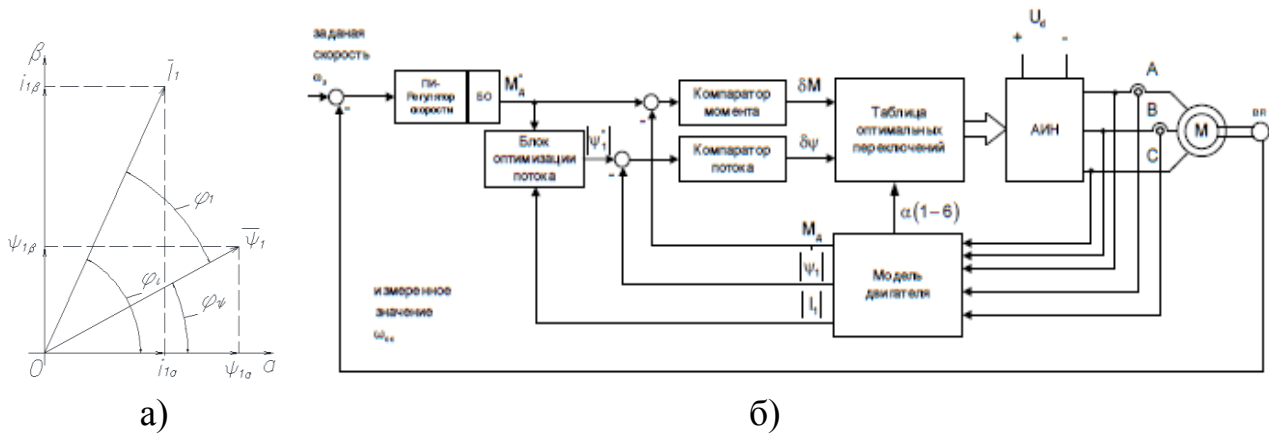


Рисунок 2 – Структурная схема прямого управления моментом с блоком оптимизации

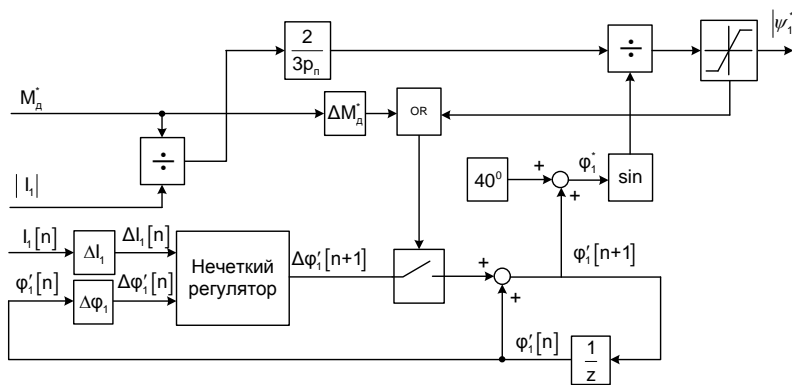


Рисунок 3 – Структура блока оптимизации потокосцепления статора с блоком коррекции на базе нечеткого поискового регулятора

За счет быстродействующих компараторов и таблицы оптимальных переключений переход с одной характеристики на другую осуществляется на порядок быстрее, чем в системах векторного управления. Блок коррекции включается в работу только в установившихся режимах. Нечеткий регулятор, используя информацию по изменению на входах тока $\Delta i_1[n]$ и угла коррекции $\Delta \phi'_1[n]$, выдает сигнал на увеличение или уменьшение угла $\Delta \phi'_1[n+1]$. Если задание на момент M_d^* начинает резко меняться или достигается предел блока ограничения по модулю $|\psi_1^*|$, то выход регулятора отключается от сумматора и в динамических режимах поддерживается скорректированный угол. Система оптимизации получилась достаточно простой, использующей минимальные сведения о двигателе как объекте управления. База логических правил нечеткого регулятора разработана из условий коррекции угла ϕ_1 в зависимости от значений тока статора. Для обеспечения полноты нечеткой модели достаточно четырех правил R1-R4:

R1: ЕСЛИ (x_1 есть «Реакция тока»=N) И (x_2 есть «Изменение угла»=N), ТО ($y = x_1$)

R2: ЕСЛИ (x_1 есть «Реакция тока»=N) И (x_2 есть «Изменение угла»=P), ТО ($y = -x_1$)

R3: ЕСЛИ (x_1 есть «Реакция тока»=P) И (x_2 есть «Изменение угла»=N), ТО ($y = x_1$)

R4: ЕСЛИ (x_1 есть «Реакция тока»=P) И (x_2 есть «Изменение угла»=P), ТО ($y = -x_1 + 0,1$)

Каждый вход нечеткого регулятора содержит две функции принадлежности (ФП). Из-за своей простоты и достаточной точности описания были исполь-

зованы треугольные и трапециевидные ФП.

Однокритериальная оптимизация по минимуму потерь в качестве сигнала обратной связи использует не ток статора, а потери двигателя. Основная часть блока оптимизации по минимуму потерь с коррекцией угла φ_1 реализует функцию поддержания угла φ_1 как в статических, так и в динамических режимах.

В многокритериальной оптимизации, представленной на рисунке 4, позволяющей наиболее полно использовать возможности нечеткого регулятора, были использованы два предыдущих критерия оптимизации: по минимуму тока и по минимуму потерь. При настройке нечеткого регулятора были определены все реакции на возможные входные воздействия, использованы два набора правил из предыдущих примеров, независимо друг от друга.

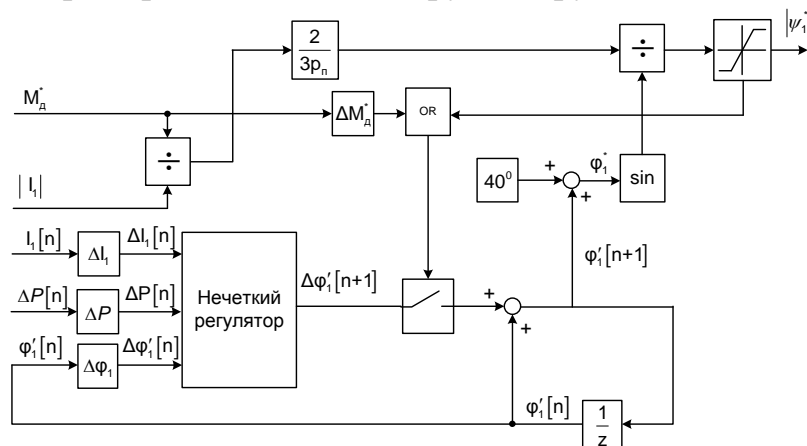
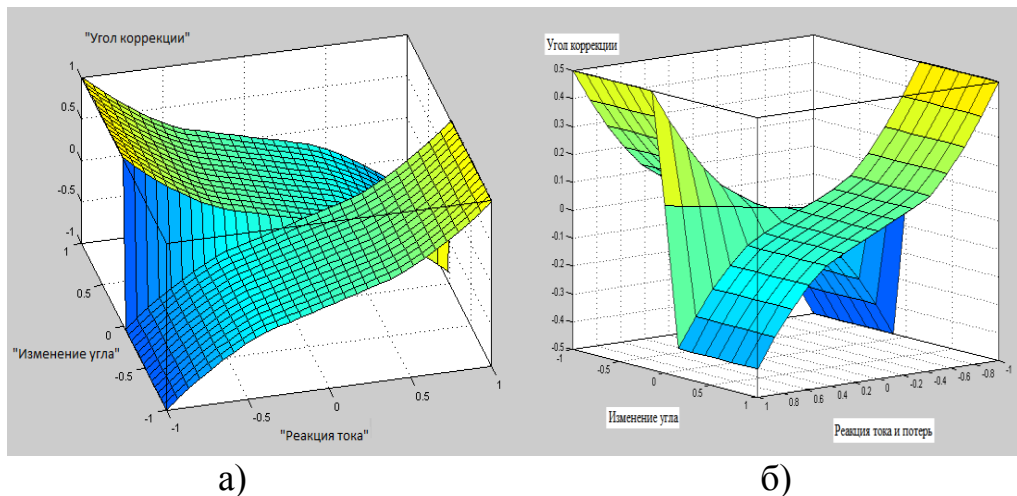


Рисунок 4 – Структура блока многокритериальной оптимизации потокосцепления статора с блоком коррекции на базе нечеткого поискового регулятора

Поверхности зависимости выходного параметра от входных при однокритериальной оптимизации по минимуму тока и многокритериальной оптимизации представлены на рисунке 5. Результаты сравнительного моделирования поисковых регуляторов на базе нечеткой логики с однокритериальной и многокритериальной оптимизацией для двигателя мощностью 37 кВт были сведены в таблицу 1.



а)

б)

Рисунок 5 – Поверхность зависимости выходного параметра от входных: а) однокритериальная, б) многокритериальная оптимизация

Таблица 1 – Результаты моделирования

$\frac{M_c}{M_H}$	Оптимизация по минимуму тока статора				Оптимизация по минимуму потерь				Оптимизация по минимуму тока статора и потерь			
	Ψ_1	Φ_{opt}	I_1	ΔP	Ψ_1	Φ_{opt}	I_1	ΔP	Ψ_1	Φ_{opt}	I_1	ΔP
0,1	0,416	52	20	60	0,416	52	20	60	0,416	52	20	60
0,2	0,56	51,5	30	165	0,64	40	33	140	0,584	47,5	30,5	151
0,3	0,63	52	40	314	0,71	40	43	285	0,69	42,9	41,8	290
0,4	0,7	52,5	49	500	0,77	39,4	53,2	430	0,712	48	49,7	488
0,5	0,71	53,5	57,4	750	0,8	42,5	61	685	0,763	47,4	58,8	710
0,6	0,75	54	65,5	1000	0,82	45	72	945	0,83	42	70,3	950
0,7	0,76	55,5	73,5	1350	0,83	50,3	74,5	1252	0,795	51,6	74	1270
0,8	0,785	55,5	81,2	1656	0,89	42	87,8	1520	0,81	51,9	82	1580
0,9	0,806	55,5	89	2022	0,91	43	97	1857	0,846	50	90,5	1940
1,0	0,816	56,5	96,5	2450	0,91	46	100,7	2227	0,88	49	99	2270

Очевидно, что при настройке были использованы не все возможности нечеткого регулятора, но даже в этом варианте получена работоспособная поисковая система.

В четвёртой главе разработаны и исследованы система прямого управления моментом с фаззи-регулятором на базе поисковых алгоритмов. Произведено обучение поисковых алгоритмов на базе гибридной сети ANFIS. Произведено моделирование рассмотренных системы управления.

Следующим этапом исследования стало построение системы ПУМ с фаззи-регулятором. Поисковые алгоритмы оптимальных режимов работы электропривода имеют серьезный недостаток, выражающийся в длительности циклов опроса системы и их количества. После внесения корректирующего воздействия поисковая система должна дожидаться окончания переходных процессов в электромагнитной цепи двигателя. Фактически процесс можно считать окончанным, если сформировано потокосцепление ротора. Была найдена зависимость между вычисляемым в ПУМ модулем потокосцепления статора $|\psi_1|$ и определяющим

время переходного процесса потокосцеплением ротора $|\psi_2|$: $|\psi_2| = |\psi_1| \frac{k_\psi}{1+T_\psi p}$. Как

видно из уравнения, скорость изменения потокосцепления ротора зависит от величины модуля $|\psi_1|$. А так как скорость формирования потокосцепления статора превосходит таковую, у потокосцепления ротора возможно применение режима форсировки магнитного потока. Для обеспечения автоматического контролируемого режима форсировки был разработан дополнительный блок формирования задания на потокосцепление статора, представленный на рисунке б.

Задание на потокосцепление статора $|\psi_1|^*$ сначала безынерционно преобразуется в сигнал заданного потокосцепления ротора $|\psi_2|^*$. Именно это значение должно сформироваться по окончании переходного процесса в двигателе. Реальное значение модуля потокосцепления статора $|\psi_1|$ поступает на передаточное звено, на выходе которого получаем текущее значение модуля $|\psi_2|$. В результате на выходе сумматора формируется сигнал $\Delta|\psi_2| = |\psi_2|^* - |\psi_2|$, пропорциональный разности меж-

ду заданным и текущим значением потокосцепления ротора. Выходной сигнал компаратора может принимать три различных состояния: 0, 1, 2. Если $\Delta|\psi_2|$ ниже порогового значения уставки компаратора, выходной сигнал равен 0, на выходе формируется форсировка по нижней допустимой границе. Если $\Delta|\psi_2|$ выше верхнего порогового значения уставки компаратора, на выходе формируется форсировка по верхней допустимой границе, чему соответствует сигнал 2. В последнем варианте $\Delta|\psi_2|$ лежит в пределах допустимых границ и на выход должен передаваться сигнал задания $|\psi_1|^*$. То есть при малых отклонениях сигнала исключается режим неоправданного усиления сигнала. Функции коммутатора выполняет выходной мультиплексор, который в зависимости от сигнала с компаратора подключает один из трех входов. В результате на выходе мультиплексора формируется сигнал задания на потокосцепление статора с учетом форсировки $|\psi_1|_{\text{фор}}^*$.

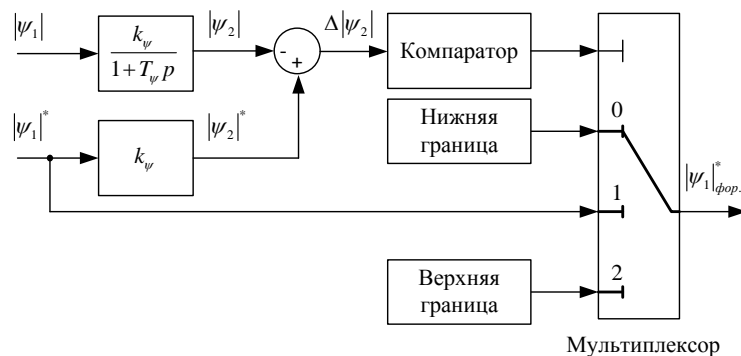


Рисунок 6 – Блок автоматического формирования задания потокосцепления статора с форсировкой

Другой способ ускорения переходных процессов по потокосцеплению статора и ротора заключается в изменении алгоритма переключения силовых элементов инвертора. В исходном алгоритме ПУМ используется таблица оптимальных переключений векторов напряжения в зависимости от текущего положения вектора потокосцепления статора и сигналов с компараторов момента δM и потокосцепления статора $\delta\psi$. При работе в каждом секторе $\alpha(1-4)$ используется только четыре ненулевых вектора. Оставшиеся два ненулевых вектора приводили бы к минимальному изменению угла Θ и, следовательно, моменту, а вот модуль потокосцепления менялся бы в более значительной степени. При работе с постоянным заданием на потокосцепление необходимости в этих состояниях вектора напряжения нет. Но для реализации оптимальных режимов работы по минимуму тока и потерь путем изменения потокосцепления в установившихся режимах работы применение таких векторов является актуальным. В усовершенствованный алгоритм были внесены добавочные векторы, увеличивающие или уменьшающие модуль потокосцепления статора в ускоренном режиме, если отклонение заданного значения от реального выше второго порога срабатывания. Для реализации такого алгоритма предлагается использовать нечеткий регулятор, приведенный на рисунке 7, который позволит проще организовать двузонное регулирование по потокосцеплению, а также в дальнейшем реализовать функцию ограничения динамического тока статора.

Входными сигналами для нечеткого регулятора, также как и для таблицы оп-

тимальных переключений, будут сигналы разности заданных и реальных значений потокосцепления статора $\Delta|\psi_1|$ и электромагнитного момента ΔM . Выделение первой зоны допустимых отклонений потокосцепления реализуется гистерезисом, вторая зона – насыщением. Отклонение по моменту ΔM ограничивается только в блоке насыщения по верхнему и нижнему пределу. Подготовленные таким образом значения, наряду с номером действующего сектора $\alpha(1-6)$, поступают на нечеткий регулятор. В этом случае вход по потокосцеплению нечеткого регулятора содержит четыре функции принадлежности (ФП), по моменту - три ФП, и по действующему сектору соответственно - шесть. Из-за своей простоты и достаточной точности описания процессов были использованы треугольные и трапециевидные ФП. Выходной переменной регулятора будет номер вектора напряжения. В качестве алгоритма функционирования нечеткого логического вывода предлагается использовать модель Такаги-Сугено (TS – модели). Правила TS – модели содержат 72 правила: 36 полностью повторяют таблицу оптимальных переключений для малых отклонений потокосцепления статора, следующие 36 - для больших отклонений с использованием дополнительной пары векторов. Графически база знаний нечеткого регулятора приведена в таблице 2.

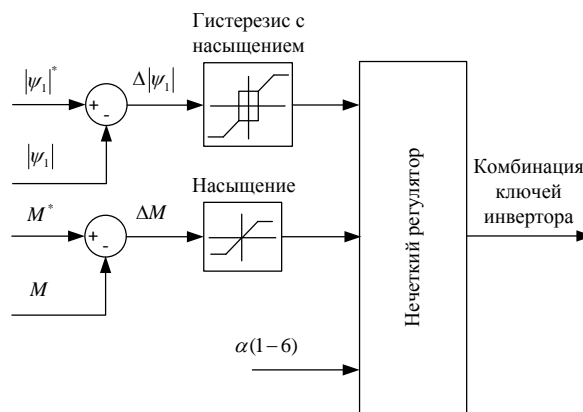


Рисунок 7 – Структурная схема нечеткого регулятора в системе ПУМ
Таблица 2 – База правил для нечеткого регулятора

Отклонение потокосцепления	Отклонение момента	Действующий сектор					
		1	2	3	4	5	6
SP	P	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}
	Z	U_{1-1}	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}	U_{1-6}
	N	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}
P	P	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}
	Z	U_{1-7}	U_{1-8}	U_{1-7}	U_{1-8}	U_{1-7}	U_{1-8}
	N	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}
N	P	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}
	Z	U_{1-8}	U_{1-7}	U_{1-8}	U_{1-7}	U_{1-8}	U_{1-7}
	N	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}
SN	P	U_{1-3}	U_{1-4}	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}
	Z	U_{1-4}	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}	U_{1-3}
	N	U_{1-5}	U_{1-6}	U_{1-1}	U_{1-2}	U_{1-3}	U_{1-4}

Согласно разработанным правилам, регулятор включает режим дополнительной форсировки потока только при условии, что момент лежит в пределах допустимых отклонений, что исключает дополнительные колебания момента в установившихся режимах. Результаты сравнительного моделирования двигателя с мощностью 37кВт приведены на рисунке 8.

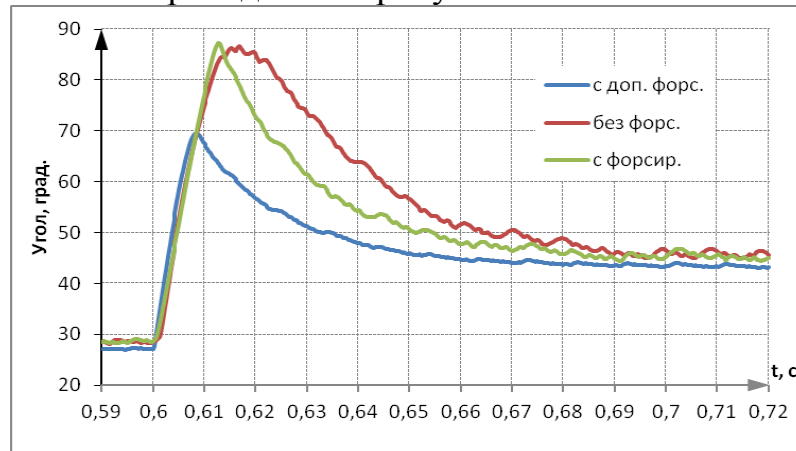


Рисунок 8 – Изменение угла между вектором тока и потокосцепления статора при различных способах формирования потокосцепления

По сравнению с таблицей оптимальных переключений с режимом форсирования потокосцепления ротора нечеткий регулятор с дополнительными векторами позволил повысить быстродействие на 12 процентов при пуске и на 55 процентов при ослаблении потокосцепления, что доказывает эффективность предложенного решения.

Следующим этапом стало обучение поискового алгоритма на базе нечеткой логики. Разработанные поисковые алгоритмы на базе нечеткой логики обладают недостатком поисковых систем в виде низкого быстродействия. В исследуемой модели для однозначной интерпретации реакции электропривода на сколь можно минимальные воздействия необходимо выявить закономерность между контролируемым параметром, например током статора I_1 , и управляющим воздействием (углом φ_1 , между вектором тока I_1 статора и потокосцепления статора ψ_1). Результаты математического моделирования в виде полученной зависимости приведены на рисунке 9. Из графика видно, что на приращение угла в один электрический градус следует однозначная реакция тока, достаточная для оценки отклонения текущего угла от оптимального значения. С помощью графического редактора адаптивных сетей нейро-нечеткого вывода ANFIS системы MATLAB полученная зависимость была использована для обучения структуры нечеткого вывода типа Сугено. Общая погрешность оценки необходимой коррекции по углу такого блока составила не более 0,2 градуса. Как показывает график, при таком отклонении от оптимального значения ток фактически не отклоняется от своего минимума.

Чтобы система нечеткого выхода работала при всех режимах нагрузки, необходимо выполнять процедуру автоматического масштабирования. Устойчивая работа обеспечивается при следующем алгоритме:

1. При неизменной нагрузке на валу двигателя подается поисковое воздействие в виде приращения угла φ_1 на 1 электрический градус: $\varphi_1[n] = \varphi_1[n - 1] + 1$.

2. Производится оценка реакции тока статора, полученная с блока автоматического масштабирования нечетким регулятором, выдающим положительное или отрицательное воздействие, согласно рисунку 9.

3. С учетом погрешности измерения тока, отработки изменения угла повторить поисковый цикл 1-2 раза.

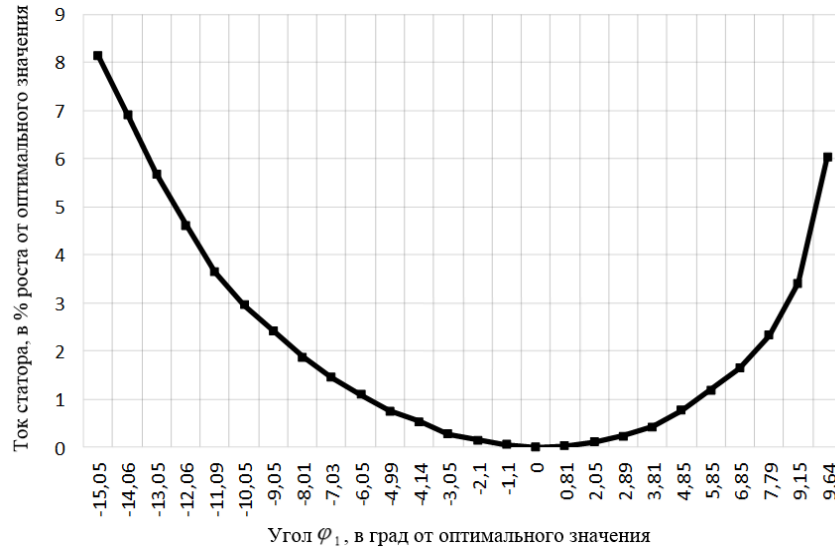


Рисунок 9 – Зависимость тока статора от угла между моментобразующими векторами

Таким образом, весь процесс поиска оптимального угла занимает 2-3 итерации. Результаты моделирования приведены на рисунке 10.

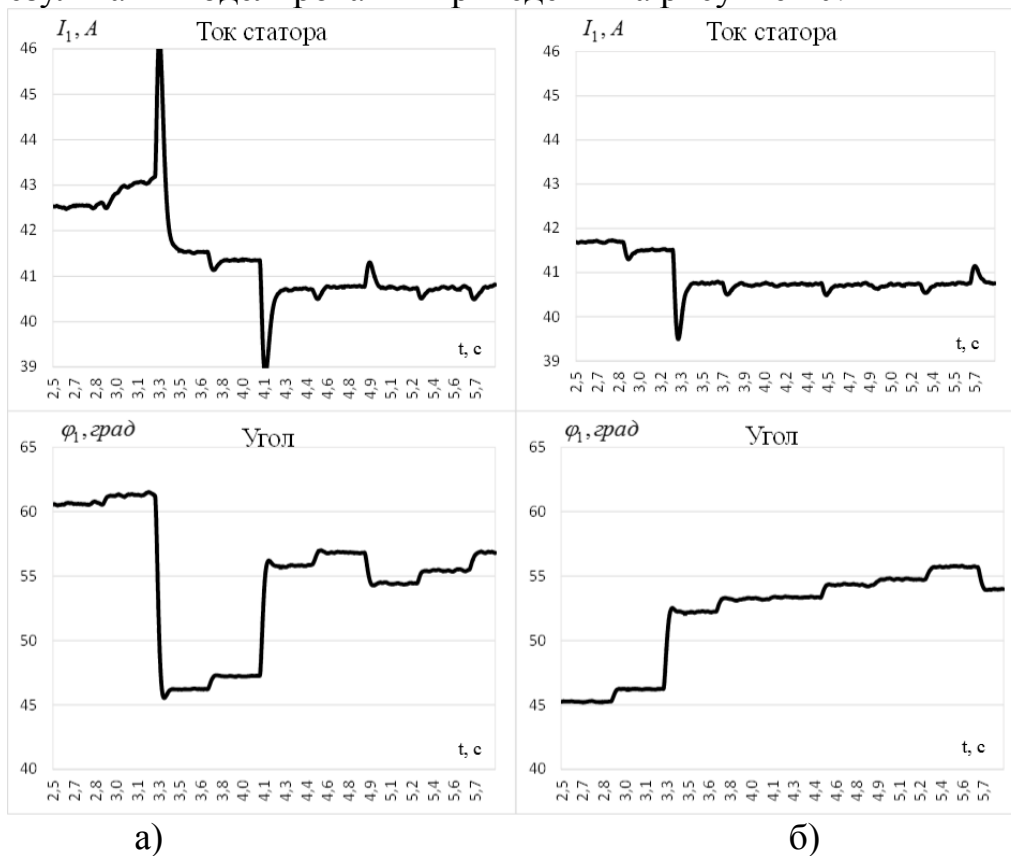


Рисунок 10 – Графики переходных процессов при работе поискового алгоритма: а) при начальном угле $\varphi_1 = 61$ град; б) при начальном угле $\varphi_1 = 45$ град.

После окончания разгона электропривода на 3-й секунде в системе включился блок автоматической коррекции. Каждый шаг алгоритма выполняется ровно 0,4 секунды. В конце первой итерации скорректированный угол составляет 46° , а после второго этапа - уже $55,8^{\circ}$, т.е. фактически оптимальное значение. Последующий, необязательный, поисковый этап лишь уточняет полученное значение до $54,42^{\circ}$. Ток при этом снижается с начальных 42,72А до оптимальных 40,7А. В другом примере (рисунок 10, б) после первого этапа значение угла составило $52,1^{\circ}$, а на втором - $53,92^{\circ}$. К концу третьей итерации получаем уже точное значение $54,9^{\circ}$. Как видно из примеров, достаточно лишь трех циклов работы поискового алгоритма для получения оптимального значения. Время шага каждого алгоритма определяется концом переходного процесса по току и может быть уменьшено. Все сигналы, приведенные на графиках и участвующие в вычислениях, были обработаны фильтром Баттерворта 3-го порядка для устранения высокочастотных пульсаций при питании от ПЧ.

Все разработанные системы частотного электропривода с управлением моментом могут найти применение на механизмах общепромышленного назначения, в частности на подъемно-транспортных механизмах, имеющих кинематические цепи без упругих элементов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработаны скалярные системы управления асинхронным двигателем, позволяющие минимизировать в установившемся режиме потребляемый ток статора при заданном статическом моменте двигателя.

2. Разработаны и исследованы блоки однокритериальной оптимизации потокосцепления статора по минимуму тока и минимуму потерь для электропривода на базе системы ПУМ. Для коррекции оптимального угла между векторами тока и потокосцепления статора предлагается использовать поисковый алгоритм на базе нечеткой логики.

3. Разработан и исследован блок двухкритериальной оптимизации для электропривода на базе системы ПУМ. Алгоритм нечеткого поиска позволяет компенсировать отклонения оптимального угла вследствие неравномерного нагрева обмоток статора и ротора, учесть потери в стали и кривую насыщения.

4. Разработан и исследован блок автоматического формирования задания потокосцепления статора с форсировкой, позволяющий ускорить нахождение оптимальной точки обеспечения энергосбережения после внесения корректирующего воздействия. Форсировка при ослаблении потока ускоряет переходный процесс на 38 % по сравнению с режимом работы без форсировки. Предложен нечеткий алгоритм оптимального переключения силовых элементов в автоматическом инверторе напряжения взамен таблицы оптимальных переключений. Нечеткий регулятор с форсированным заданием позволил сократить продолжительность переходного процесса на 46%, сократив время между циклическими опросами в поисковых методах.

5. Разработана и исследована гибридная сеть, позволяющая получить однозначную реакцию электропривода на сколь можно минимальное воздействие. В результате проведенного исследования обучения поискового алгоритма на базе нечеткой логики был разработан быстродействующий поисковый алгоритм,

использующий сведения о реакции тока статора на изменение угла управления, что позволило сократить необходимое количество итераций с 10-30 до 2-3.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Синюкова, Т.В. Метод ускорения поискового алгоритма для прямого управления моментом / Т.В. Синюкова, П.Н. Левин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – №12. – С. 60-63.

2. Синюкова, Т.В. Повышение эффективности поискового алгоритма при реализации энергосберегающего режима за счет форсирования магнитного потока в переходных режимах / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – №6. – С. 25-30.

Патенты

3. Пат. на полезную модель Российской Федерации 132282, мпк Н 02 Р 27/05. Устройство для управления асинхронным двигателем с фазным ротором [Текст] / Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Мещерякова О.В.; заявитель и патентообладатель Липецкий государственный технический университет. – №2013100617; заявл. 09.01.2013. Бюл. №25. – 10 с.

4. Пат. Российской Федерации 2512873, мпк Н 02 Р 27/06. Электропривод переменного тока [Текст] / Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Мещерякова О.В.; заявитель и патентообладатель Липецкий государственный технический университет. – № 2013100760 заявл.09.01.2013. Бюл. №10. – 13 с.

Публикации в других изданиях

5. Синюкова, Т.В. Анализ основных методов частотного управления / Т.В. Синюкова, В.Н. Мещеряков // Сборник докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2011. – С. 33.

6. Синюкова, Т.В. Моделирование асинхронного двигателя с преобразователем частоты в программе MATLAB/ В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Современные сложные системы управления X HTCS` 2012: материалы Международной научно-технической конференции. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – С. 53-54.

7. Синюкова, Т.В. Модель асинхронного двигателя с преобразователем частоты/ В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова // Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» 21-24 мая 2012 г. Липецк. – Из-во: Першина Р.В., Тамбов, 2012 г. – С. 168-169.

8. Синюкова, Т.В. Моделирование частотного преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока и инвертором напряжения / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова // Сборник докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2012. – С. 112-113.

9. Синюкова, Т.В. Частотный асинхронный электропривод с минимизацией потерь энергии/ В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова, А.А. Муравьев // VII Международная (XVIII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, 2-4 октября 2012. – Иваново, 2012. – С. 152-154.

10. Синюкова, Т.В. Математическое моделирование асинхронного двигателя с фазным ротором с преобразователем частоты / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова, О.В. Мещерякова // Областная научная конференция по проблемам технических наук. 18-19 октября 2012. – ФГБОУ «ЛГТУ», 2012. – С. 124-126.

11. Синюкова, Т.В. Косвенное определение частоты вращения роторной эдс / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова // Материалы региональной научно-технической конферен-

ции: Автоматизация и роботизация технологических процессов, 16-17 ноября 2012. – Воронеж, 2012. – С. 71-72.

12. Синюкова, Т.В. Нечеткий алгоритм оптимизации энергетических параметров асинхронного электропривода / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Международная заочная научно-практическая конференция «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». – 2013. – ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – №1 (1) – С. 118-125.

13. Синюкова, Т.В. Информационная система слежения за электромагнитными процессами, происходящими в двигателе переменного тока/ В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова // Сборник материалов докладов XIV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИТС-2013. – Нижний Новгород, 2013. – С. 181.

14. Синюкова, Т.В. Применение нечеткой логики для реализации энергосбережения в электроприводе / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук: материалы областного профильного семинара, 26-27 сентября 2013 г. – Липецк, 2013. – С. 106-107.

15. Синюкова, Т.В. Обеспечение оптимальных режимов работы электропривода с применением поисковых алгоритмов / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Материалы областной научно-практической конференции по проблемам технических наук, 24-25 октября 2013г. – Липецк, 2013. – С. 88-90.

16. Синюкова, Т.В. Система управления асинхронным двигателем с фазным ротором / Т.В. Синюкова, В.С. Бочарников // Сборник докладов традиционной конференции студентов и аспирантов. – Липецк, 2014. – С. 91-92.

17. Синюкова, Т.В. Обучение поискового алгоритма на базе нечеткой логики / П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Автоматизированный электропривод и автоматика: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции 1-4 июля 2014 г. – Липецк, 2014. – С. 44-47.

18. Синюкова, Т.В. Системы управления электроприводами переменного тока / Т.В. Синюкова, А.В. Синюков // Материалы научной конференции по проблемам технических наук, 7 ноября 2014г. – Липецк, 2014. – С. 130-131.

19. Синюкова, Т.В. Нечеткая логика в системах управления электроприводами переменного тока/ П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Материалы научной конференции по проблемам технических наук, 7 ноября 2014г. – Липецк, 2014. – С. 131-133.

20. Синюкова, Т.В. Нечеткая логика в системах управления алгоритмами металлургических предприятий / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Современная металлургия начала нового тысячелетия. В 80-летию НЛМК (Программа «Кадры для регионов»): сборник научных трудов международной научно-практической конференции 17-21 ноября 2014 г. - Липецк, 2014. – С. 126-129.

21. Синюкова, Т.В. Гибридные сети в электроприводе / В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова, А.В. Синюков // Сборник материалов докладов XXI Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИТС-2015. – Нижний Новгород, 2015. – С. 155.

Другие публикации:

22. Синюкова, Т.В. Моделирование электропривода с дополнительной коррекцией напряжения статора для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова, А.И. Бойков // Вестник национального технического университета «ХПИ» Тематический выпуск: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика – Харьков, 2013. – №36 (1009). – С. 519.

23. Синюкова, Т.В. Бездатчиковое определение частоты вращения роторной эдс. / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова // Научно-технический журнал Вестник ЛГТУ. – Липецк, 2014. – С. 117-120.