

На правах рукописи



Данилов Владимир Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ
ЧАСТОТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мещеряков Виктор Николаевич.

Официальные оппоненты:

Федяева Галина Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО БГТУ);

Благодаров Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

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

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 года в 12³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан «07» октября 2019 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.В. Телегин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. На металлургических предприятиях непрерывные процессы, связанные с транспортировкой вырабатываемого металлопроката, обслуживаются агрегатами, в основном оснащенными частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами с векторным и скалярным управлением, работающими в интенсивном повторно-кратковременном режиме с частыми пуско-тормозными режимами с ПВ% до 60%, а также с возможной редкой более высокой нагрузкой. Высокие требования в отношении работоспособности металлургического транспортного оборудования, работающего в этих условиях, определяют применение асинхронных двигателей, мощность которых оказывается несколько завышенной при условиях нормальной работы. Кратность пускового момента в основном не превышает значения $K=1.2$, а статический момент двигателя составляет около 30% от номинального значения. Энергетические показатели и динамические свойства применяемых типовых систем частотного асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением могут быть улучшены путем использования систем коррекции. При построении систем коррекции необходимо, сохраняя подход к минимизации количества используемых датчиков, использовать возможности идентификации недоступных для измерения переменных с помощью наблюдателей, осуществляющих требуемые расчеты на основании математических моделей, устанавливающих связи между переменными двигателя. Несмотря на значительный объем выполненных исследований в области асинхронных электроприводов с системами коррекции, использующими наблюдатели переменных двигателя, их практическое использование в металлургическом производстве остается достаточно ограниченным. Поэтому сохраняется актуальность решения задач, связанных с разработкой и исследованием новых систем частотного скалярного и векторного управления с дополнительными корректирующими устройствами, улучшающими энергетические и динамические характеристики электроприводов переменного тока с асинхронными двигателями.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К».

Объект и предмет исследования. Объектом являются системы частотного асинхронного электропривода металлургических транспортных механизмов с векторным и скалярным управлением. Предметом исследования являются системы коррекции динамических и энергетических характеристик асинхронных электроприводов с векторным и скалярным управлением.

Цель работы. Повышение энергоэффективности и улучшение динамических свойств систем частотного асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением, применяемых на металлургических транспортных механизмах, за счет использования блоков коррекции, вырабатывающих корректирующие сигналы на основе идентификации переменных двигателя, недоступных для измерения.

Идея работы заключается в создании асинхронных электроприводов металлургических транспортных механизмов с векторным и скалярным управлением с применением систем коррекции сигналов задания намагничивающей составляющей тока статора или амплитуды и частоты питающего напряжения, действие которых направлено на улучшение энергетических характеристик электроприводов, за счет оптимизации взаимного положения векторов переменных, формирующих момент асинхронного двигателя, и динамических характеристик за счет использования наблюдателя момента.

Задачи диссертационной работы:

- анализ систем частотного управления асинхронными электроприводами, применяемых на механизмах транспортировки металла, и выбор наилучших вариантов, допускающих возможность применения корректирующих средств, улучшающих пусковые характеристики и энергетические показатели;
- исследование методами структурного анализа и компьютерного моделирования возможности повышения устойчивости асинхронного двигателя в системах электропривода с частотным регулированием путем применения корректирующих средств;
- разработка и исследование асинхронного электропривода с векторным управлением с улучшенными энергетическими характеристиками, анализ и синтез наиболее эффективно действующих корректирующих средств;
- разработка и исследование системы асинхронного электропривода со скалярным управлением с улучшенными динамическими свойствами, достигаемыми за счет применения коррекции задающих сигналов, на основе идентификации электромагнитного момента двигателя и определения отклонения частот вращения ротора и поля статора;
- разработка системы коррекции асинхронного электропривода со скалярным управлением для повышения энергоэффективности в установившемся режиме работы.

Научная новизна работы:

- установлено, что наименьшее отношение переменных «ток статора / момент» достигаемое в системе частотного управления, поддерживающей угол φ'_0 между векторами тока статора и потокосцепления ротора ненасыщенного двигателя на уровне 45^0 , может быть обеспечено за счет поддержания системой управления оптимального значения $\Delta\omega$ - отклонения угловой скорости ротора от скорости вращения поля статора ненасыщенного двигателя, которое должно быть обратно пропорциональным постоянной времени обмотки ротора двигателя, а при насыщенной магнитной цепи двигателя намагничивающая составляющая тока статора должна поддерживаться на постоянном уровне, при этом угол φ'_0 и отклонение скоростей $\Delta\omega$ должны возрастать по мере увеличения тока статора;
- установлено, что в системе асинхронного электропривода со скалярным управлением для подавления колебаний электромагнитного момента целесообразно использовать систему коррекции, отличающуюся одновременной подачей корректирующих сигналов по двум каналам, регулирующим амплитуду

и частоту питающего двигателя напряжения, при этом сигналы коррекции определяются на основе идентификации электромагнитного момента и измерения скорости двигателя;

- доказано, что в системе векторного управления асинхронным электроприводом для достижения минимума отношения «ток статора / момент двигателя» в установившемся режиме при неполной статической нагрузке двигателя необходимо использовать системы коррекции, отличающиеся выработкой корректирующего воздействия, влияющего на задающий сигнал намагничивающей составляющей тока статора, причем корректирующий сигнал можно определить на основе идентификации тангенса угла между векторами тока статора и потокосцепления ротора, а также на основе сравнения измеренных значений продольной и поперечной составляющих вектора тока статора.

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается выполненными сопоставлениями данных, полученных при аналитических исследованиях, компьютерном моделировании, с данными, полученными экспериментальным путем, а также определяется отсутствием противоречий с положениями теории электропривода и теории автоматического управления.

Теоретическая значимость работы:

- в разработке принципов параллельной коррекции систем асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением, для обеспечения лучших энергетических характеристик, динамических показателей и стабилизации пускового момента двигателя, путем корректирующего воздействия на сигналы задания намагничивающей составляющей тока статора или амплитуды и частоты напряжения статора, с выработкой сигналов коррекции, определяемых в результате наблюдения за углом между векторами тока статора и основного потокосцепления или потокосцепления ротора, а также идентификации значения электромагнитного момента двигателя;

- в обеспечении лучшей энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет применения корректирующего устройства, реализующего выравнивание намагничивающей и активной проекций вектора тока статора на оси прямоугольной системы координат d, q ;

- в обеспечении лучших динамических свойств и повышении энергоэффективности асинхронного электропривода со скалярным управлением за счет применения корректирующих устройств.

Практическая значимость работы. Разработаны системы асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением, в которых в установившемся режиме работы отношение «ток статора / момент» двигателя снижено в среднем на 5%.

Улучшены динамические свойства системы частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением, что делает ее конкурентоспособной системам частотного асинхронного электропривода с векторным управлением.

Реализация результатов работы. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ). Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на ООО «Промэлектроника» г. Липецк.

Научные результаты, выносимые на защиту:

- структурные схемы АД, имеющие наглядный и удобный вид для выполнения структурных преобразований, результаты их анализа, имитационные модели и результаты компьютерного моделирования разработанных систем асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением;
- основные закономерности и графики, характеризующие работу векторной системы асинхронного электропривода с корректирующими устройствами, реализующими новые расчетные алгоритмы при коррекции задающих сигналов, изменяющиеся в зависимости от степени насыщения магнитной цепи двигателя, полученные в результате аналитических исследований, компьютерного моделирования и подтвержденные на экспериментальной установке;
- основные закономерности и графики, характеризующие работу скалярной системы асинхронного электропривода с корректирующими устройствами, включающими наблюдатели недоступных для измерения переменных, полученные в результате аналитических исследований, компьютерного моделирования и подтвержденные на экспериментальной установке;
- результаты экспериментальных исследований оптимальных режимов работы систем частотного асинхронного электропривода со скалярным и векторным управлением на опытном стенде, подтверждающие результативность использования систем коррекции управляющих воздействий для повышения энергоэффективности электроприводов;
- результаты экспериментальных исследований и анализа работы частотного асинхронного электропривода с векторным управлением конвейерного механизма транспортировки металла, содержащего цепную передачу, с циклически изменяющимся моментом на валу приводного двигателя, доказывающие эффективность применения предложенной системы коррекции намагничивающей составляющей тока статора.
- новые схемные и алгоритмические решения для реализации предложенных систем коррекции, позволяющих повысить энергоэффективность асинхронных электроприводов и улучшить их динамические свойства.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Методология и методы диссертационного исследования. В диссертационной работе поставленные задачи решались с использованием методов теории электропривода, теории автоматического управления, математического моделирования нелинейных систем с применением пакетов прикладных программ, методов экспериментального подтверждения. Решение уравнений при компьютерном моделировании математических моделей осуществлялось численными методами в программной оболочке MatLAB/Simulink.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты представлялись и обсуждались на: 5-й Международной научно-практической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии» (г. Липецк, 2012 г.), 12-й Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» (г. Липецк, 2017 г.), 24-й Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (г. Нижний Новгород, 2018 г.), 20-м Международном научно-промышленном форуме «Великие реки» (г. Нижний Новгород, 2018 г.), 5-й Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (г. Тамбов, 2018 г.), I-й Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» (г. Липецк, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 статьи в других изданиях, 8 докладов на конференциях, 2 патента на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 9 приложений. Общий объём диссертации - 182 страницы, в том числе 144 страницы основного текста, 47 рисунков, 19 таблицы, список литературы из 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, указан объект исследований, сформулированы цель и идея работы, показано соответствие работы тематике специальности, определена научная новизна работы, представлены основные защищаемые положения, а также результаты апробации и реализации работы.

В первой главе рассмотрены основные принципы построения систем частотного асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением. Проведен обзор асинхронных электроприводов и систем их управления с точки зрения возможности их применения на металлургических механизмах транспортировки металла, таких как цепные конвейеры и рольганги. Отмечено, что большинство применяемых на данных механизмах систем асинхронного электропривода оснащены датчиком скорости, устанавливаемом на валу двигателя. Рассмотрены работы В.А. Мищенко, М. Сассиато, направленные

на минимизацию тока статора в системе асинхронного электропривода.

На основе анализа систем частотного асинхронного электропривода со скалярным и векторным управлением, показано, что при работе с неполной статической нагрузке минимум отношения «ток статора / момент» может быть получен за счет поддержания угла между векторами тока статора и потокосцепления ротора двигателя на оптимальном уровне 45° , что потребует разработки наблюдателя угла между векторными переменными.

Рассмотрены принципы построения и структурная реализация наблюдателей неизмеряемых переменных асинхронного двигателя.

Во второй главе анализируются математические модели асинхронного двигателя, среди которых наиболее удобной является структурная модель (рисунок 1), представленная во вращающейся системе координат X, Y , в которой входной сигнал задания вектора напряжения является сигналом постоянного тока. Ось X совмещена с вектором напряжения статора. В модели используются следующие обозначения: U_{1x} - проекция вектора напряжения статора на ось X ; i_{1x}, i_{1y} - проекции вектора тока статора на оси координат; Ψ_{1x}, Ψ_{1y} - проекции вектора потокосцепления статора; Ψ_{2x}, Ψ_{2y} - проекции вектора потокосцепления ротора; R_1 - активное сопротивление обмотки статора; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ - индуктивность обмотки статора; $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ - приведенная к статору индуктивность ротора; L_m - взаимная индуктивности фаз статора и ротора; $L_{1\sigma}$ - индуктивность рассеивания статора; $L'_{2\sigma}$ - приведенная к статору индуктивность рассеивания ротора; p_n - число пар полюсов двигателя.

Передаточная функция (рисунок 1), описывающая инерционность электромагнитных процессов, протекающих в обмотке ротора двигателя, относительно процессов в обмотке статора, имеет вид:

$$W_2(p) = \frac{1}{T_\Theta p + 1}, \quad (1)$$

где T_Θ – постоянная времени звена, описывающего зависимость между потокосцеплениями статора и ротора.

$$T_\Theta = \frac{L_1 L'_2 - L_m^2}{L_1 R'_2}. \quad (2)$$

Электромагнитный момент двигателя рассчитывается по формуле

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} (\Psi_{1y} \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}). \quad (3)$$

Анализ процессов в линеаризованной структурной схеме электрической части АД, полученной на основе схемы (рисунок 1), при скачкообразном изменении амплитуды напряжения, постоянстве круговой частоты питающего напряжения $\omega_{1эл} = \text{const}$ и разности приведенных круговых частот вращения ротора и поля статора $\Delta\omega_{эл} = \text{const}$, показал, что характеристическое уравнение имеет 4-й порядок, его коэффициенты зависят от $\omega_{1эл}$ и $\Delta\omega_{эл}$, данная структурная математическая модель описывает колебательную систему.

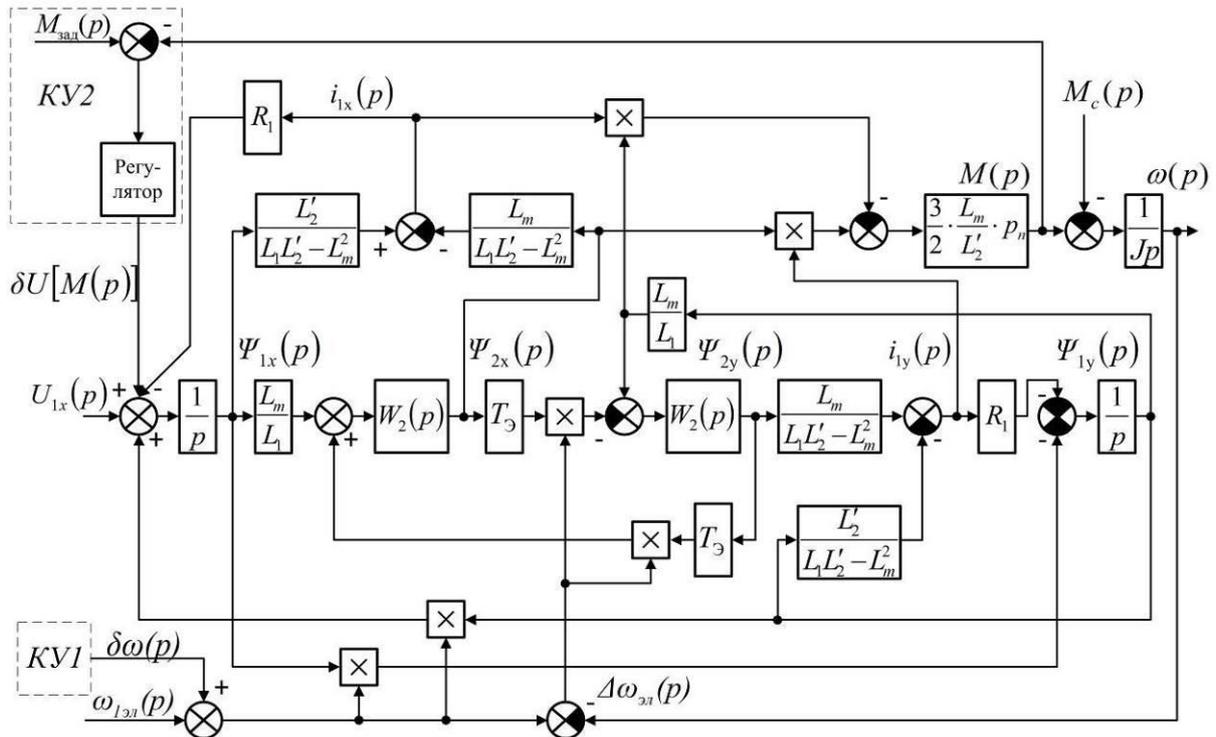


Рисунок 1 - Структурная схема АД в системе координат X, Y

Для снижения амплитуды колебаний момента предложено введение двух корректирующих блоков задания частоты (КУ1) и амплитуды (КУ2) питающего напряжения. Коррекция сигналов $\omega_{эл}$ и $\Delta\omega_{эл}$ позволяет ослабить отрицательное влияние на устойчивость модели АД перекрестных связей структурной схемы. Для формирования корректирующего сигнала амплитуды напряжения необходимо расчетным путем определить момент двигателя. Эффективность действия предложенной системы коррекции была подтверждена при компьютерном моделировании системы частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением.

Выполнен анализ уравнений АД для установившегося режима при ненасыщенной магнитной цепи. Основные результаты анализа, позволившие определить оптимальные режимы работы АД, приведены в таблице.

Условием достижения минимума отношения «ток статора/момент» соответствует угол $\varphi'_{0\text{ опт } I_1} = 45^\circ$ между векторами тока статора \dot{I}_1 и потокосцепления ротора $\dot{\Psi}_2$, (рисунок 2) при этом отклонение угловых частот

$$\Delta\omega_{эл \text{ опт } I_1} = (\omega_{эл} - \omega_{рн})_{\text{ опт }} = \text{tg}\varphi'_{0 \text{ опт }} \cdot \frac{R'_2}{L'_2}. \quad (4)$$

Условием достижения минимума потерь энергии в двигателе при заданном моменте двигателя соответствует угол $\varphi'_{0 \text{ опт } \Delta P_1} = \varphi_{\text{ опт } I_1} - \delta \approx 39^\circ$, при этом отклонение угловых частот

$$\Delta\omega_{эл \text{ опт } \Delta P} = \frac{R'_2}{\sqrt{(L'_m + L'_{2\sigma})^2 + L'^2_m \cdot R'_2/R_1}}. \quad (5)$$

Таблица - Соотношения между показателями оптимальных систем: с минимизацией тока статора и минимизацией потерь в обмотках

КРИТЕРИЙ	МИНИМУМ ОТНОШЕНИЯ «ТОК СТАТОРА/МОМЕНТ» ($I_{1 \min}$)	МИНИМУМ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ДВИГАТЕЛЯ (ΔP_{\min})
ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ	$I_1^2 = M \frac{\omega_0 \cdot \beta}{3R_2'} \cdot \frac{(x_m + x_2')^2 + R_2'^2/\beta^2}{x_m^2};$ $\beta = \Delta\omega_{\text{ЭЛ}}/\omega_{0\text{ЭЛ}}$	$\Delta P = 3 \cdot (I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2')$ $I_1^2 = M \frac{\omega_0 \cdot \beta}{3R_2'} \cdot \frac{(x_m + x_2')^2 + R_2'^2/\beta^2}{x_m^2};$ $I_2'^2 = \frac{M \cdot \omega_0 \cdot \beta}{3R_2'}$
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ	$(L_m + L_2')^2 - R_2'^2/\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}^2 = 0$	$[(L_m + L_{2\sigma}')^2 - R_2'^2/\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}^2] \cdot R_1 + R_2' \cdot L_m^2 = 0$
ОПТИМАЛЬНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ $\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}$	$\Delta\omega_{\text{ЭЛ опт } I_1} = \text{tg}\varphi'_{0 \text{ опт } I_1} \cdot \frac{R_2'}{L_2'}$	$\Delta\omega_{\text{ЭЛ опт } \Delta P} = \frac{R_2'}{L_2' \sqrt{(1 + L_m^2 \cdot R_2' / (L_2'^2 \cdot R_1))}}$
ТАНГЕНС ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА	$\text{tg}\varphi'_{0 \text{ опт } I_1} = 1$	$\text{tg}\varphi'_{0 \text{ опт } \Delta P} = \Delta\omega_{\text{ЭЛ опт } \Delta P} \cdot (L_2'/R_2') =$ $= \frac{1}{\sqrt{(1 + L_m^2 \cdot R_2' / (L_2'^2 \cdot R_1))}}$
ОПТИМАЛЬНЫЙ УГОЛ	$\varphi'_{0 \text{ опт } I_1} = 45^\circ$	$\varphi'_{0 \text{ опт } \Delta P} \approx 39...40^\circ$

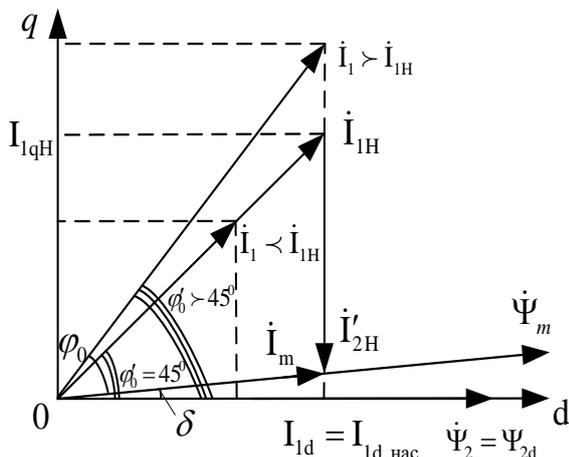


Рисунок 2 - Векторная диаграмма АД

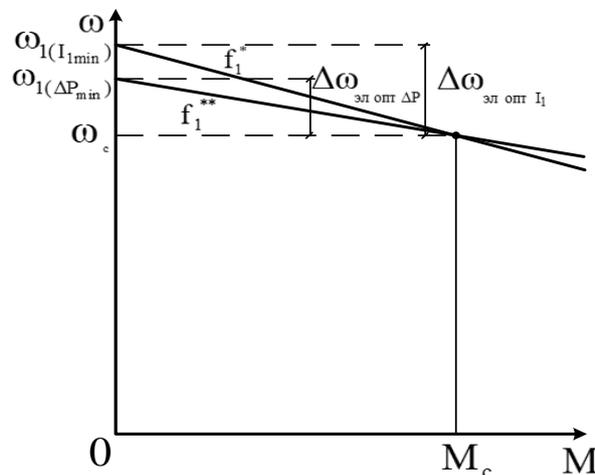


Рисунок 3 - Механические характеристики при разных значениях $\Delta\omega_{\text{опт}}$

Статические механические характеристики АД (рисунок 3) при настройке на минимум потерь имеют большую жесткость, что обеспечивается путем снижения частоты и повышения амплитуды питающего напряжения.

В третьей главе рассматриваются системы асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением, исследуются методы их коррекции, позволяющие улучшить энергетические показатели при неполной стати-

ческой нагрузке. Исследована система асинхронного электропривода с векторным управлением, функциональная схема которой приведена на рисунке 4. Данная система электропривода является развитием системы асинхронного электропривода, защищенной патентом на полезную модель №180979. Действие системы коррекции поясняется векторной диаграммой (рисунок 2). Если ток статора меньше номинального значения система коррекции поддерживает равенство проекций тока на оси d и q. Если ток статора превышает номинальное значение, то действие системы коррекции прекращается и поддерживается постоянство продольной составляющей тока статора I_d . Разработано два схемных решения корректирующих устройств (КУ) (рисунок 4), позволяющих реализовать предложенный метод коррекции.

Первый тип корректирующего устройства КУ1 работает на основе определения универсальной переменной $\text{tg} \varphi'_0 = I_q / I_d$. Затем вычисляются ее отклонение от заданного значения и коррекция сигнала задания на потокосцепление ротора Ψ_2^* . Второй тип корректирующего устройства КУ2 работает на основе определения рассогласования между проекциями тока статора I_q и I_d с дальнейшим расчетом сигнала коррекции задания на потокосцепление ротора Ψ_2^* , также возможна коррекция сигнала задания тока I_d^* .

Было выполнено исследование энергетических показателей электропривода со стандартной системой управления и при использовании блока коррекции на компьютерной модели, реализованной в программной среде MATLAB Simulink.

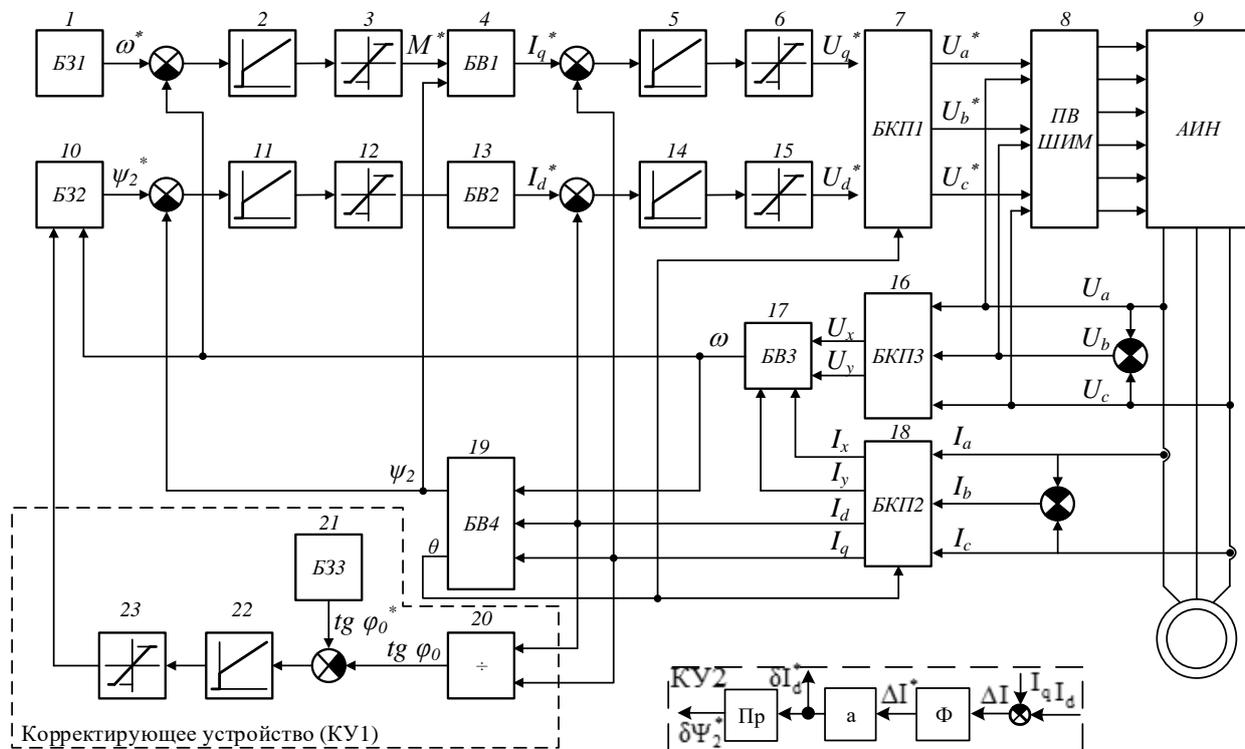


Рисунок 4 - Функциональная схема системы векторного управления с ориентацией по вектору потокосцепления ротора и системами коррекции

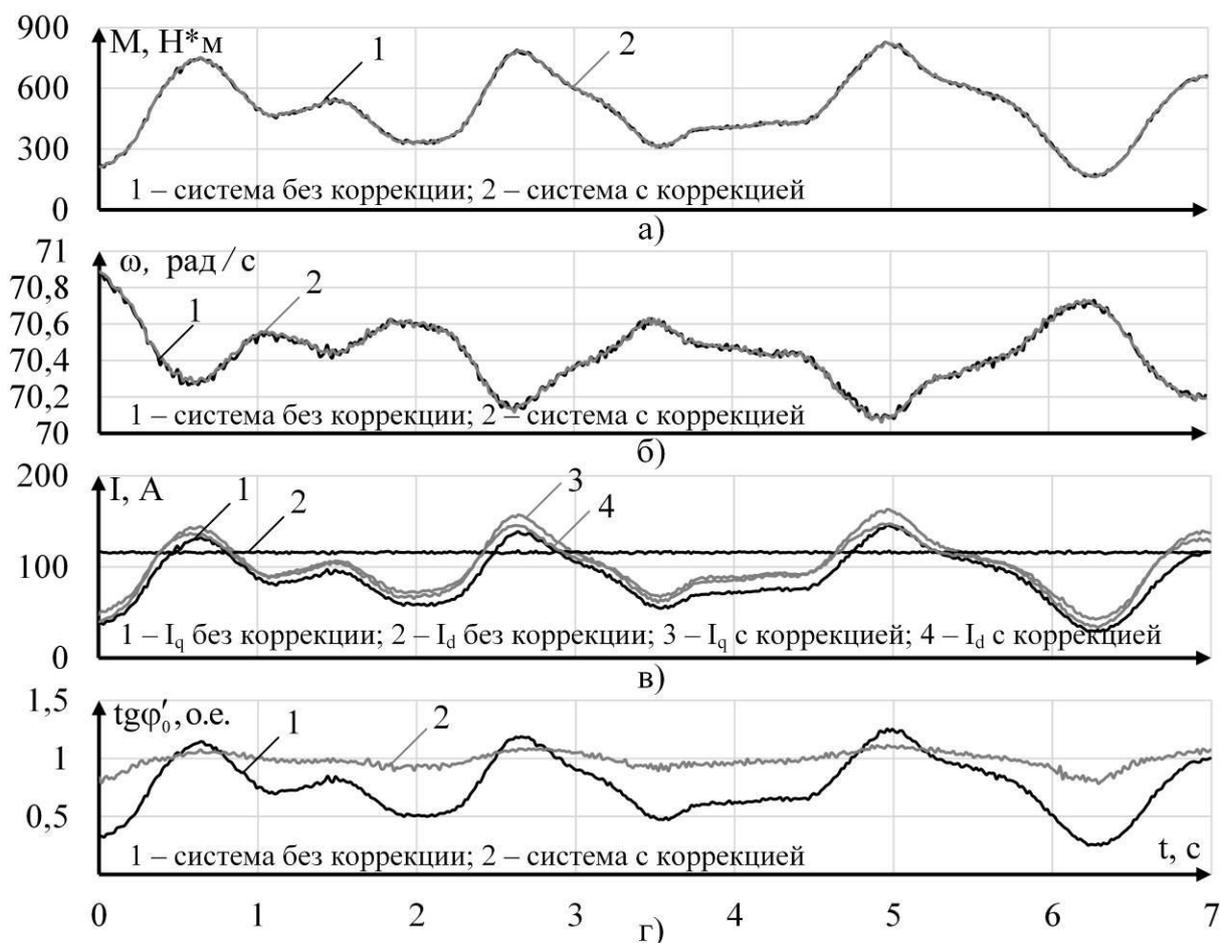


Рисунок 6 - Графики изменения переменных АД, в системах без блока коррекции и с блоком коррекции: а - $M(t)$; б - $\omega(t)$; в - $I_{iq}(t), I_{id}(t)$; г - $\operatorname{tg}\varphi'_0(t)$;

Выполненные расчеты для рассматриваемой системы электропривода показали, что при изменении нагрузки в диапазоне от 10% до 100%, действующее значение тока статора снизилось в среднем на 5%, что подтверждает энергосберегающий эффект работы разработанной системы коррекции.

На металлургических транспортных механизмах широко применяются системы асинхронного частотного электропривода со скалярным управлением. Работа таких электроприводов на ряде механизмов сопровождается значительными колебаниями момента. Выполненный анализ показал, что стабилизация только $\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}$, применяемая в некоторых современных электроприводах, не позволяет подавить колебания момента.

Разработана система асинхронного электропривода со скалярным управлением с двухканальной коррекцией (рисунок 7), имеющая улучшенные динамические свойства с ограничением колебаний момента.

Для улучшения динамических свойств электропривода предложен дополнительный блок коррекции напряжения с наблюдателем момента АД, его структурная схема, являющаяся математической моделью, выделена на рисунке 7 пунктирной линией. В наблюдателе момент определяется по формуле

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot p_n \cdot (\psi_{2\alpha} i_{1\beta} - \psi_{2\beta} i_{1\alpha}). \quad (7)$$

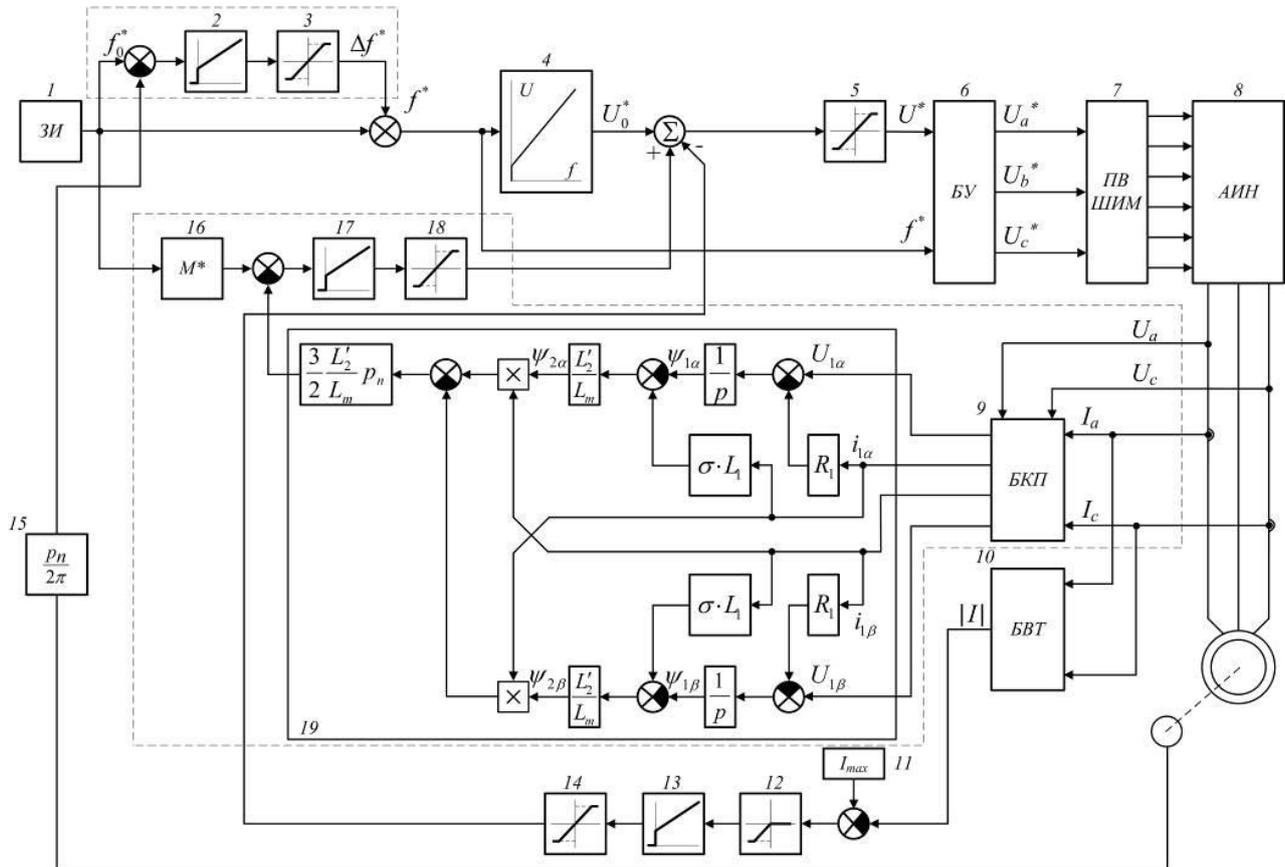


Рисунок 7 - Функциональная схема системы скалярного управления АД с блоками коррекции

В качестве входных сигналов наблюдателя момента использованы измеренные и отфильтрованные сигналы фазных токов и напряжений, также возможно использование сигналов задания фазных напряжений. Уровень требуемых корректирующих сигналов $U(\Delta M)$ и Δf^* устанавливался опытным путем при настройке системы коррекции.

В результате компьютерного моделирования системы асинхронного электропривода со скалярным управлением с двигателем АДЧР355SMB6У2 ($P_{ном} = 200$ кВт) установлено, что система двухканальной коррекции, выполненная с использованием корректирующего блока, поддерживающего заданное значение Δf^* , непосредственно влияющего на $\Delta \omega_{эл}$, и дополнительного блока коррекции напряжения, построенного с использованием наблюдателя момента, позволяет подавить колебания момента и скорости АД (рисунок 8).

Разработана скалярная система управления асинхронным электроприводом, выполненным без датчика скорости, с коррекцией напряжения и частоты, направленной на поддержание угла $\phi'_{0_{опт}} = 45^\circ$ (рисунок 9), обеспечивающая улучшение энергетических показателей.

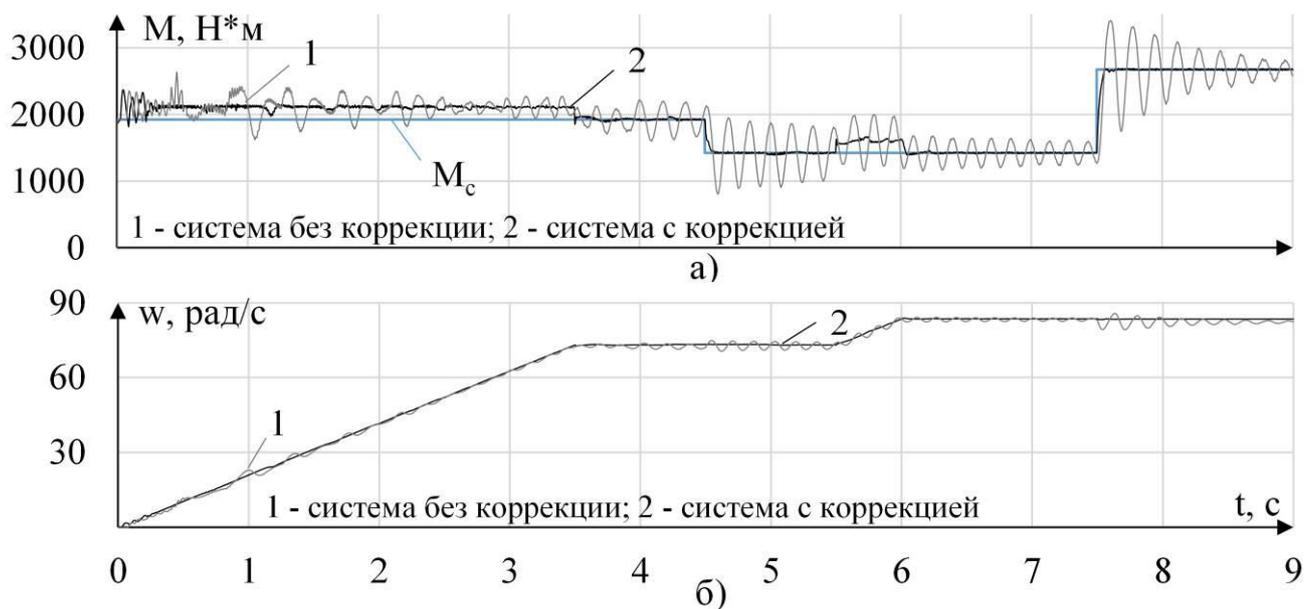


Рисунок 8 - Графики изменения во времени:
а - скорости вращения; б - момента электродвигателя

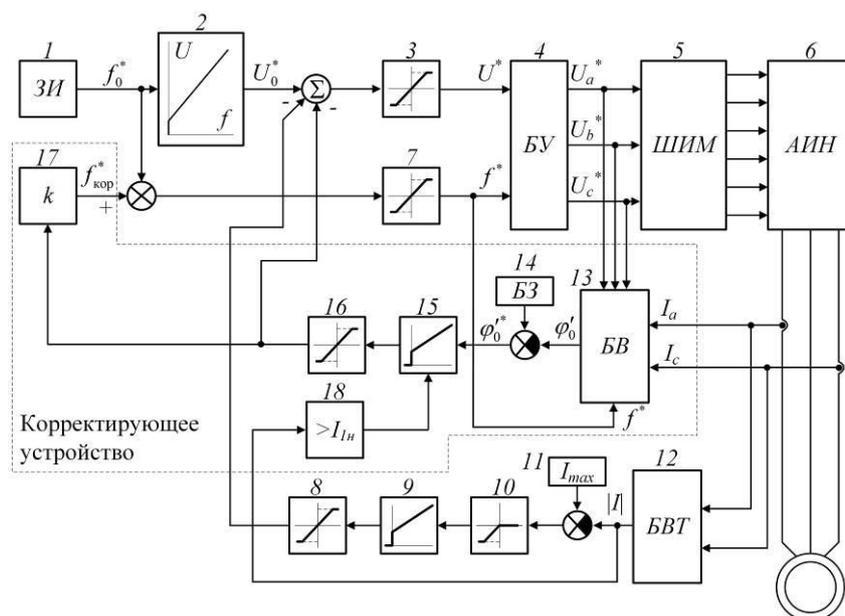


Рисунок 9 - Функциональная схема частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением и системой коррекции напряжения и частоты

Корректирующее устройство (КУ) содержит наблюдатель угла ϕ_0 между векторами тока статора и основного потокосцепления БВ, вычисляющий ϕ_0 на основании определения угла сдвига фаз ϕ между мгновенными значениями задаваемых фазных напряжений и измеренных фазных токов статора АД. Действие КУ производится после окончания пуска и направлено на коррекцию питающего напряжения и частоты для поддержания угла $\phi_0 = 45^\circ$, что обеспечивает работу электропривода в энергосберегающем режиме с минимумом отношения «ток статора / момент» АД и позволяет снизить величину тока статора при изменении нагрузки в широком диапазоне в среднем на 5%.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований систем частотного электропривода с векторным и скалярным управлением. На испытательном стенде (рисунок 10), исследовался АД АИР71В4У3 с ПЧ SINAMICS S120, который нагружался с двигателем постоянного тока ДП-12 с тиристорным преобразователем SIEMENS Simoreg DC Master.



Рисунок 10 - Элементы испытательного стенда

В результате проведенных экспериментов системы скалярного частотного управления АД были получены графики (рисунок 11), подтверждающие наличие оптимального значения $\Delta\omega_{\text{элпт}}$, при котором достигается минимум отношения «ток статора/момент».

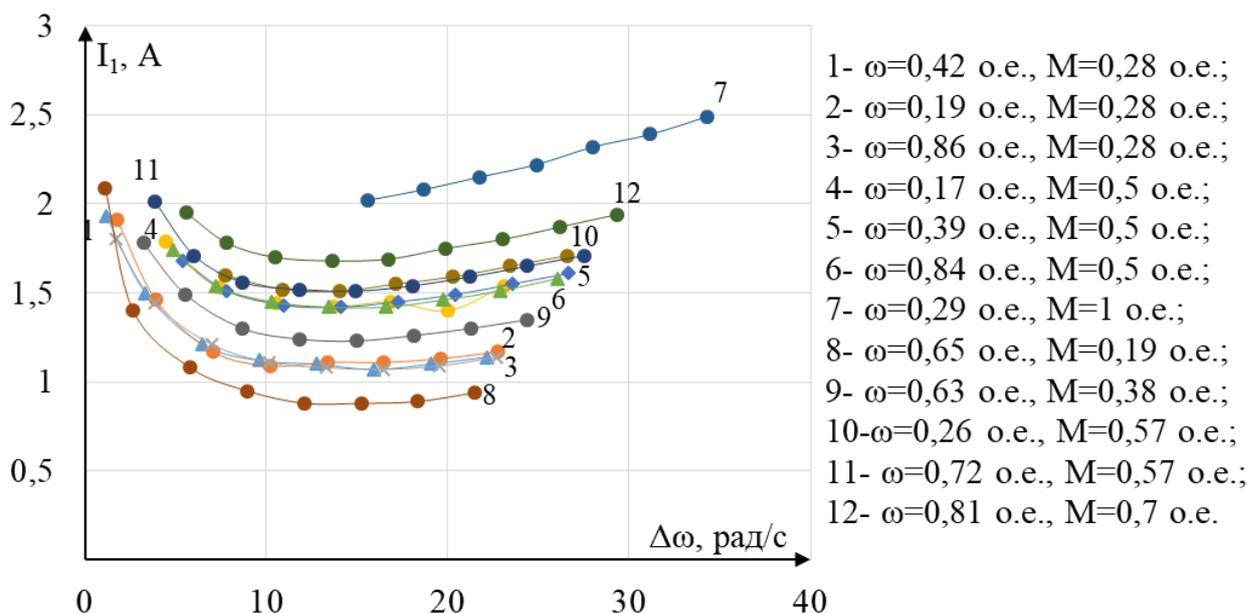


Рисунок 11 - Зависимость тока статора I_s от $\Delta\omega_{\text{эл}}$ при постоянных значениях момента

Также экспериментально доказано, что за счет коррекции сигнала задания частоты напряжения статора, с поддержанием угла $\phi'_{0\text{пт}} = 45^\circ$, обеспечивается значение $\Delta\omega_{\text{элпт}}$ и достигается минимум отношения «ток статора/момент» (рисунок 11). Доказана возможность корректирующей настройки закона управления стандартной системы частотного управления на энергосберегающий режим, при котором ток статора снижается в среднем на 5% при изменении статического момента от 10% до 75% номинального значения.

Проведены эксперименты на действующем агрегате - цепном конвейере, получены графики зависимости от времени основных переменных асинхронного электропривода с векторным управлением в динамических режимах работы электропривода (рисунок 6). Выполнен анализ результатов эксперимента. Полученные данные использованы при проведении имитационного компьютерного моделирования электропривода.

Результаты экспериментов подтвердили результаты аналитических исследований и компьютерного моделирования систем электропривода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных в диссертационной работе исследований была решена актуальная научная задача, заключающаяся в разработке систем частотно-регулируемого асинхронного электропривода с улучшенными динамическими свойствами и энергетическими показателями, адаптированных к условиям работы на транспортных агрегатах металлургического производства.

Основные результаты, полученные в диссертации, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Выполненный анализ систем частотного асинхронного электропривода, применяемых на механизмах транспортировки металла, позволил обосновать выбор рациональных структур систем векторного и скалярного управления и корректирующих средств для этих систем, улучшающих пусковые характеристики и энергетические показатели электроприводов.

2. Исследована методами структурного анализа и компьютерного моделирования возможность повышения устойчивости асинхронного двигателя в системах частотного электропривода за счет применения корректирующих средств, вырабатывающих корректирующие сигналы на основе идентификации переменных двигателя, недоступных для измерения, доказано, что угол φ'_0 между векторами тока статора \dot{I}_1 и потокосцепления ротора $\dot{\Psi}_2$ для ненасыщенного двигателя должен быть на уровне 45° , а при насыщенной магнитной цепи двигателя намагничивающая составляющая тока статора должна поддерживаться на постоянном уровне, при этом угол φ'_0 и отклонение скоростей $\Delta\omega$ должны возрастать по мере увеличения тока статора.

3. Разработаны и исследованы системы асинхронного электропривода с векторным управлением с улучшенными энергетическими характеристиками, выполнен анализ и синтез наиболее эффективно действующих корректирующих средств, осуществляющих выработку корректирующего сигнала, воздействующего на сигнал задания продольной составляющей тока статора, либо на основе сравнения тангенса идентифицированного угла φ'_0 между векторами тока статора \dot{I}_1 и потокосцепления ротора $\dot{\Psi}_2$ с заданным значением равным единице, либо на основе определения разности между продольной и поперечной составляющими вектора тока статора \dot{I}_1 .

4. Разработана и исследована система частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением с улучшенными динамическими ха-

рактическими, максимальное отклонение момента от среднего значения уменьшилось в среднем в 4.2 раза, за счет применения системы коррекции, работающей на основе идентификации электромагнитного момента, измерения скорости асинхронного двигателя и определения отклонения частот вращения ротора и поля статора.

5. Разработана и исследована система коррекции сигнала задания амплитуды и частоты напряжения асинхронного электропривода со скалярным управлением, действие которой основано на идентификации угла между векторами тока статора и тока намагничивания, обеспечивающая снижение отношения «ток статора / момент» АД в установившемся режиме работы в среднем на 5%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованные ВАК РФ:

1. Данилов, В.В. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Электротехнические системы и комплексы. - 2018. - №3(40). С.4-11.

2. Данилов, В.В. Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. - Т. 18. № 3. С. 88-97.

3. Данилов, В.В. Асинхронный электропривод с частотно-токовым управлением и системой коррекции сигналов задания амплитуды и частоты тока статора / В.Н. Мещеряков, А.А. Шпиганович, О.В. Мещерякова, В.В. Данилов // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2018. - №1. С. 21-29.

4. Данилов, В.В. Определение оптимального абсолютного скольжения для минимизации тока статора асинхронного двигателя при заданной нагрузке на валу / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2018. - №3. С. 19-28.

Публикации в других изданиях:

5. Danilov, V. Adjustment of vector control system for induction motor / Meshcheryakov V., Danilov V., Mescheryakova O. // Meridian Inginersc. Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association. - 2017. - №4. p.59-61.

6. Данилов, В.В. Коррекция векторной системы управления асинхронным электроприводом для повышения энергоэффективности/В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2019. - №5. С. 28-32.

7. Данилов, В.В. Системы однодвигательного и двухдвигательного частотно-каскадного асинхронного электропривода / В.Н. Мещеряков, Д.В. Ла-

сточкин, В.А. Зотов, В.В. Данилов // Энергетические и электротехнические системы. Международный сборник научных трудов. Выпуск 4. Магнитогорск: МГТУ, 2017. С. 215-224.

8. Данилов, В.В. Математическое моделирование синхронного двигателя с учетом насыщения / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Сборник докладов V международной научно-практической конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии». Липецк: ЛГТУ, 2012. С 42-46.

9. Данилов, В.В. Математическое моделирование современных систем электропривода / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Материалы 12-й Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления». Липецк: ЛГТУ, 2017. С. 148-152.

10. Данилов, В.В. Форсирование напряжения при пуске асинхронного электропривода на базе инвертора тока с векторным управлением / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов, О.В. Мещерякова // Труды 24-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии" ИСТ 2018. Нижний Новгород: НГТУ, 2018. С.700-705.

11. Данилов, В.В. Реализация энергосберегающих режимов в системах частотного и частотно-каскадного электропривода / В.Н. Мещеряков, О.В. Крюков, В.В. Данилов, Д.В. Ласточкин // 20-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки» Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. Том 3. С.55-60.

12. Данилов, В.В. Математическая модель асинхронного электропривода с векторным управлением для исследования влияния составляющих тока статора на энергетические показатели / В.В. Данилов, О.В. Мещерякова, В.Н. Мещеряков // Материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах». Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2018. С. 280-282.

13. Данилов, В.В. Математическое моделирование процесса намагничивания асинхронного электродвигателя / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов, О.В. Мещерякова // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. Булатовские чтения: сборник статей. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2018. Том 6. С. 221-224.

14. Данилов, В.В. Применение нейронных сетей в системах электропривода производственных механизмов и мобильных роботов / О.В. Мещерякова, В.В. Данилов, В.Н. Мещеряков // Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике. Материалы Международной молодежной научно-практической конференции. Новочеркасск: Лик, 2018. С. 8-13.

15. Данилов, В.В. Электропривод цепного конвейера на базе асинхронного двигателя с векторным управлением и улучшенными энергетическими показателями / В.Н. Мещеряков, В.В. Данилов // Материалы I-й Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные и ин-

теллектуальные технологии на транспорте» Липецк: ЛГТУ, 2018. Т1. С. 228-234

16. Данилов, В.В. Электропривод переменного тока: пат. №180979 Российская Федерация. №2017144652 / Мещеряков В.Н., Данилов В.В., Мещерякова О.В., Ласточкин Д.В., Безденежных Д.В.; заявл. 19.12.2017; опубл. 03.07.2018, Бюл №19. 9 с.

17. Данилов, В.В. Устройство для управления асинхронным двигателем с фазным ротором: пат. №180843 Российская Федерация. №2018100691 / Мещеряков В.Н., Данилов В.В., Мещерякова О.В., Ласточкин Д.В.; заявл. 10.01.2018; опубл. 03.07.2018, Бюл №19. 7с

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: разработка математических моделей асинхронного электропривода [1-3, 5, 8,9,13]; разработка наблюдателей переменных для асинхронных электроприводов [2]; анализ энергетических показателей [4,6,11], составление структурной модели, ее преобразование и анализ [7, 11]; разработка систем коррекции асинхронных электроприводов [10, 12]; разработке новых энергоэффективных систем электропривода с частотным управлением [16,17].

Подписано в печать 30.09.2019. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Ризография. Печ. л. 1,0. Тираж 125 экз. Заказ № 636.

Издательство Липецкого государственного технического университета.

Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ.

398055 Липецк, ул. Московская, 30.