

На правах рукописи



Мещерякова Ольга Викторовна

НЕЙРОСЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ
РОБОТОВ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, Шпиганович Алла Александровна.

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».

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 «Тамбовский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится «22» декабря 2017 года в 15⁰⁰ 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 « 13 » октября 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



В.И. Бойчевский

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Устойчивая тенденция внедрения в промышленность устройств с адаптивным управлением, к которым можно отнести мобильные роботы, определяет необходимость продолжения работ по совершенствованию систем и алгоритмов управления их электроприводами, в том числе реализуемых на базе нейроконтроллеров. При этом, несмотря на значительный объем исследований в области электроприводов постоянного и переменного тока, применяемых на механизмах передвижения мобильных роботов, работающих в условиях изменяющихся параметров и возмущающих воздействий разного уровня, вопросы создания эффективных систем с адаптивным регулятором скорости, в качестве которого может применяться нейроконтроллер, решены не полностью. Актуальными являются задачи проведения сравнительных исследований систем электропривода постоянного тока и асинхронного электропривода с релейным регулированием тока в обмотках двигателей и нейросетевым регулированием скорости, а также разработки новых систем частотно-токового управления асинхронным электроприводом с дополнительными нейросетевыми корректирующими устройствами, улучшающими их динамические и энергетические характеристики, делающими их конкурентоспособными электроприводу постоянного тока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-48-480492 «Анализ, математическое моделирование и оптимизация управления электромеханическими системами с электроприводами переменного тока мехатронных устройств, манипуляторов и грузоподъемных механизмов».

Объектом исследования являются системы нейросетевого управления электроприводами, выполненными на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронного двигателя, имеющими релейно-гистерезисные системы формирования токов в обмотках двигателей, предназначенные для использования на механизмах передвижения мобильных роботов.

Цель работы. Разработка и исследование систем нейросетевого управления электроприводами постоянного тока и асинхронными электроприво-

дами мобильных роботов с обеспечением заданных пусковых и регулировочных механических характеристик, достигаемых в асинхронном электроприводе с частотно-токовым управлением за счет использования нейросетевых блоков коррекции.

Идея работы. Заключается в создании систем нейросетевого управления электроприводами постоянного тока и асинхронными электроприводами с векторным и скалярным частотно-токовым управлением, имеющих внутренний контур релейно-гистерезисного регулирования токов в обмотках двигателей и внешний контур регулирования скорости, на базе унифицированных преобразующих и управляющих элементов, с применением в асинхронных электроприводах нейросетевой коррекции взаимного положения моментобразующих векторов, что позволяет улучшить динамические и энергетические характеристики систем электропривода механизмов передвижения мобильных роботов.

Для достижения сформулированной цели требуется решение следующих задач:

- анализ систем нейросетевого управления и выбор наилучших вариантов для построения нейроконтроллеров, управляющих скоростью электропривода, коррекцией пусковых характеристик, математическое моделирование и экспериментальные исследования динамических процессов в электроприводах мобильных роботов с нейросетевым управлением;

- разработка и исследование систем нейросетевого управления электроприводами мобильных роботов: постоянного тока с релейно-гистерезисным регулированием тока якоря и асинхронного электропривода с векторным управлением с релейно-гистерезисным регулированием тока статора, с улучшенными пусковыми характеристиками;

- структурно-топологический анализ векторной модели асинхронного двигателя и исследование возможности повышения его устойчивости в системах частотного электропривода за счет применения корректирующих средств;

- разработка и исследование систем идентификации взаимного положения моментобразующих векторов переменных асинхронного двигателя на базе наблюдателей углов между векторными переменными и принципов коррекции системы управления асинхронным электроприводом с частотно-токовым управлением;

- разработка и исследование систем частотно-токового управления асинхронным двигателем с использованием нейросетевых корректирующих средств, обеспечивающих улучшенные пусковые характеристики для повышения конкурентоспособности электропривода при применении на мобильных роботах.

Методы исследования. В работе использовались методы структурных преобразований теории автоматического управления, корневой метод анализа динамических свойств систем, методы математического моделирования нелинейных динамических систем с применением пакетов прикладных программ и численных методов решения, методы экспериментального подтверждения.

Научная новизна работы:

- на основании анализа структурной модели асинхронного двигателя установлено, что для подавления колебаний переменных в электромагнитной системе асинхронного двигателя и стабилизации момента двигателя необходима нелинейная коррекция скольжения и амплитуды тока статора двигателя, направленная на стабилизацию взаимного положения векторов тока статора и потокосцепления ротора;

- установлено, что энергетические показатели асинхронного электропривода с векторным управлением, работающего в установившемся режиме с неполной статической нагрузкой, могут быть улучшены и достигнуто снижение в среднем на 5% отношения «ток статора / момент двигателя», путем коррекции сигнала задания проекции вектора тока статора на ось ортогональной системы координат, положение которой совпадает с положением вектора потокосцепления ротора, отличающейся тем, что действие системы

коррекции основано на сравнении проекций вектора тока статора на обе координатные оси и направленно на достижение равенства этих проекций;

- доказано, что нейросетевые регуляторы скорости обеспечивают адаптивную настройку контуров регулирования скорости двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с векторным управлением с необходимым быстродействием, за чего достигается лучшее качество управления при резко изменяющихся управляющих и возмущающих воздействиях и изменении момента инерции электропривода по сравнению с использованием типовых пропорционально-интегральных регуляторов скорости.

Теоретическая значимость работы состоит:

- в достижении повышенного быстродействия при формировании пусковых и регулировочных характеристик электропривода постоянного тока с релейно-гистерезисным регулированием тока якоря за счет применения нейросетевого регулятора скорости, обеспечивающего отработку управляющих и возмущающих воздействий без перерегулирования;

- в разработке принципа нейросетевой встречно-параллельной коррекции асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением, обеспечивающего стабилизацию пускового момента двигателя, путем воздействия с помощью нейроконтроллера на сигналы задания амплитуды и частоты тока статора, с выработкой корректирующих сигналов на основе наблюдения за углом между векторами тока статора и основного потокосцепления, определяемого путем обработки сигналов измеренных мгновенных значений тока и напряжения статора;

- в обеспечении лучшей стабилизации пусковых и регулировочных характеристик асинхронного электропривода с векторным управлением с внутренним контуром релейно-гистерезисного регулирования фазных токов статора за счет применения нейросетевого регулятора скорости, реализующего отработку управляющих и возмущающих воздействий без перерегулирования.

Практическая значимость работы. Разработан асинхронный электропривод с частотно-токовым управлением, в котором в установившемся режиме работы отношение «ток статора / момент» двигателя снижено в сред-

нем на 5%, что повышает временной ресурс работы аккумуляторной батареи, питающей электропривод мобильного робота.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 5-7%, сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории электропривода.

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

Новые научные положения, выносимые на защиту:

- результаты сравнительного анализа и экспериментальных исследований систем управления электроприводом постоянного тока: с нейроконтроллером, установленным только в прямом канале управления; с косвенным управлением, в которой нейронная сеть используется как модель системы;

- нейросетевая система управления скоростью импульсно-регулируемого электропривода постоянного тока, имеющего внутренний контур релейно-гистерезисного регулирования тока якоря, математическая модель и результаты моделирования электропривода;

- аналитические выражения, устанавливающие связи между переменными асинхронного двигателя в динамических режимах, полученные с использованием математической модели системы «источник тока - асинхронный двигатель», представленной в структурном виде во вращающейся со скоростью магнитного поля статора ортогональной системе координат X,Y;

- принципы построения и функциональные схемы наблюдателей, осуществляющих идентификацию угла между векторами тока статора и потокосцепления ротора (или основного потокосцепления) асинхронного двигателя при частотно-токовом управлении;

- нейросетевая система формирования входных сигналов в асинхронном электроприводе с векторным управлением, математическая модель и резуль-

таты экспериментальных исследований асинхронного электропривода с векторным управлением;

- система асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением, с внутренним контуром релейно-гистерезисного регулирования фазных токов статора, внешним контуром управления скоростью, и нейросетевым корректирующим устройством, влияющим на сигналы задания частоты и амплитуды тока статора.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 9-й Всероссийской школе и конференции молодых ученых "Управление большими системами". Липецк. 21-24 мая 2012; Региональной научно-технической конференции «Автоматизация и роботизация технологических процессов». Воронеж. 16-17 ноября 2012 г.; 11-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии". Нижний Новгород. 17 апреля 2015 г.; 12-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии". Нижний Новгород. 22 апреля 2016; 13-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии" Нижний Новгород. 21 апреля 2017 г.; Международной научно-технической конференции Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии. Липецк. 2012 г.; 7-й Международной конференции АЭП 2012. Иваново 2-4 октября 2012 г.; Международной научно-технической конференции "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах". Севастополь, 14-19 сентября 2014 г.; Международной научно-практической конференции "Современная металлургия начала нового тысячелетия". 17-21 ноября 2014 г.; 5-й Международной научно-практической конференции «Металлургия нового тысячелетия». Липецк. 8-10 декабря 2015 г.; 16-й Международной научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока". Екатеринбург. 05 сентября 2015 г.; 10-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Дивноморское. Геленджик. 11-16 сентября 2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в издании, входящем в систему цитирования СКОПУС, 14 тезисов докладов на конференциях и статей в других изданиях, 5 патентов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 7 приложений. Общий объём диссертации - 170 страниц, в том числе 159 страниц основного текста, 74 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 107 наименований.

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 так же результаты апробации и реализации работы.

В первой главе с позиции теории управления электроприводами рассмотрены основные принципы построения систем управления скоростью и моментом электропривода постоянного тока и асинхронных электроприводов, применяемых на мобильных роботах. Показано, что при питании от аккумуляторной батареи, системы реверсивного электропривода постоянного тока с импульсным управлением и асинхронного электропривода близки по составу коммутирующих ключевых элементов и схеме их соединения, в этих системах целесообразно применение наиболее простых систем релейно-гистерезисного регулирования тока в обмотках двигателей.

Проведен обзор электроприводов и систем их управления с точки зрения возможности их применения на мобильных роботах и удобства построения систем нейросетевого управления. На основе анализа систем частотного асинхронного электропривода со скалярным и векторным управлением, показано, что энергосберегающий режим при работе с неполной статической нагрузкой может быть получен за счет поддержания угла между векторами переменных двигателя на оптимальном уровне близком к 45° .

Проведен обзор систем нейросетевого управления. Рассмотрены методы подражающего, инверсно-прямого и адаптивного косвенного управления.

Для идентификации систем электропривода целесообразно применять нейронные сети прямого распространения, а также модель нелинейной авто-регрессии со скользящим средним NARMA-L2.

Во второй главе анализируются математические модели асинхронного двигателя при его питании от источника тока, характерные при частотно-токовом управлении АД. Преобразованная структурная схема, построенная во вращающейся системе координат X,Y при принятом условии постоянства потокосцепления статора, приведена на рисунке 1.

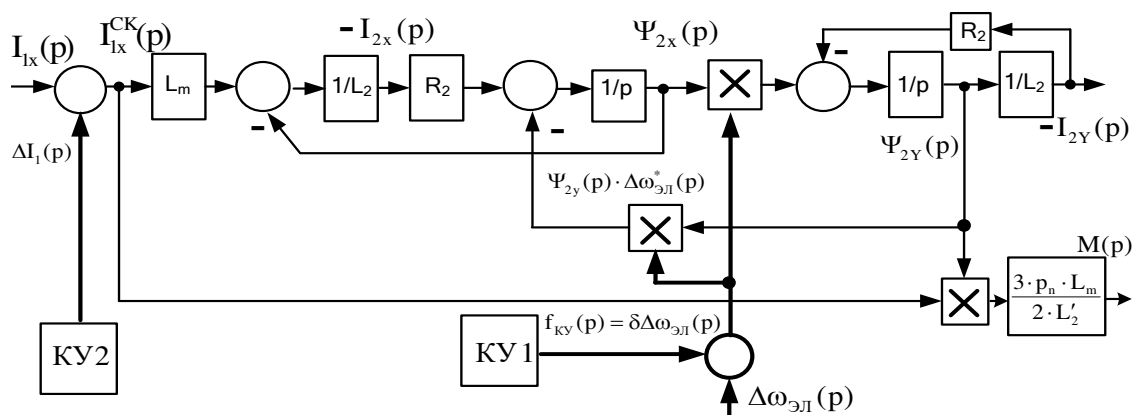


Рисунок 1 – Структурная схема АД при питании от источника тока

Сигнал $I_1(p)=I_{1x}(p)$ является управляющим $I_{1y}(p)=0$, а на вход второго канала подается рассогласование $\Delta\omega_{эл}(p)$ электрической круговой частоты вращения поля статора и приведенной частоты вращения ротора

$$\Delta\omega_{эл}(p)=\omega_{1эл}(p)-\omega p_n, \quad (1)$$

где ω - частота вращения ротора; p_n - число пар полюсов.

Структурно-топологический анализ векторной модели АД позволил получить выражения, связывающие переменные двигателя, показывающие, что переходные процессы являются колебательными. Выражение для момента преобразовано к следующему виду

$$M(p)=\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L'_2} I_{1x}(p) \Psi_{2y}(p) = \frac{3 p_n}{2} \frac{L_m^2}{L'_2} I_{1x}^2(p) \frac{1}{(T_{эт} \Delta\omega_{эл})^{-1} (T_{эт} p+1)^2 + T_{эт} \Delta\omega_{эл}} = \frac{3 p_n}{2} \frac{L_m^2}{L'_2} I_{1x}^2(p) \frac{\text{tg} \phi'_0}{(1+\text{tg} \phi_0'^2) (T_{эт} p+1)}, \quad (3)$$

где

$$\delta \text{tg} \phi'_0(p) = \frac{\delta \Psi_{2y}(p)}{\delta \Psi_{2x}(p)} = \frac{T_{эт} \Delta\omega_{эл}}{T_{эт} p+1}. \quad (4)$$

$$\delta \Psi_{2x}(p) = \frac{L_m (T_{эт} p+1)}{T_{эт}^2 p^2 + 2 T_{эт} p+1 + (T_{эт} \Delta\omega_{эл})^2} \delta I_{1x}(p); \quad (5)$$

$$\delta\Psi_{2Y}(p) = \frac{L_m T_{ЭТ} \Delta\omega_{эл}}{T_{ЭТ}^2 p^2 + 2T_{ЭТ} p + 1 + (T_{ЭТ} \Delta\omega_{эл})^2} \delta I_{1X}(p), \quad (6)$$

где $T_{ЭТ}$ - электромагнитная постоянная времени цепи ротора; φ'_0 - угол между векторами тока статора и потокосцепления ротора.

В установившемся режиме при ненасыщенной магнитной цепи максимум отношения «момент / ток статора» достигается, при оптимальной настройке системы управления с обеспечением $\varphi'_{0\text{ОПТ}} = \pi/4$, при этом

$$\Delta\omega_{эл\text{ОПТ}} = (\omega_{эл1} - \omega_{P_n})_{\text{ОПТ}} = \frac{R'_2 \operatorname{tg}\varphi'_{0\text{ОПТ}}}{L'_2} = \frac{R'_2}{L'_2}. \quad (7)$$

Для подавления колебаний момента АД предложено осуществлять динамическую коррекцию сигналов управления по каналам регулирования амплитуды и частоты тока статора с применением нейронных сетей.

В третьей главе рассматриваются системы асинхронного электропривода с векторным (рисунок 2) и частотно-токовым (рисунок 3) управлением, и исследуются методы их коррекции, позволяющие улучшить энергетические показатели при неполной статической нагрузке с достижением уменьшения в среднем на 5% отношения «ток статора / момент».

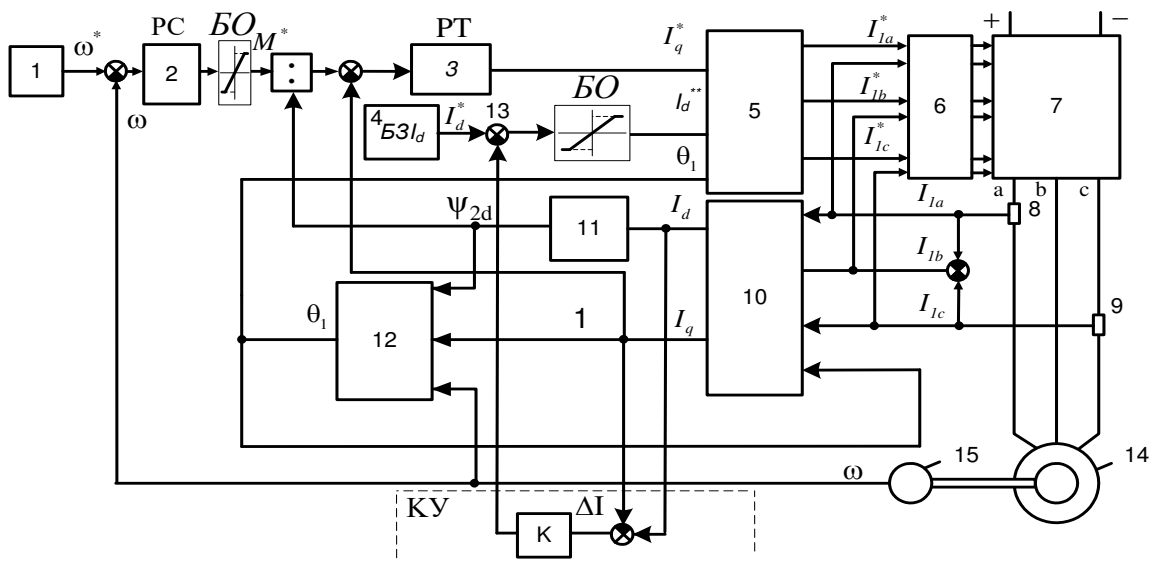


Рисунок 2 – Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением с коррекцией продольной составляющей тока статора

Для асинхронных электроприводов со скалярным частотно-токовым управлением разработаны системы и идентификации угла между моментобразующими переменными, предложены корректирующие устройства и си-

стемы релейно-гистерезисного формирования фазных токов в обмотках статора, защищенные патентами на изобретения №2447573, №2512873, №2582202, №2528612, № 2539347, патентом на полезную модель №132282.

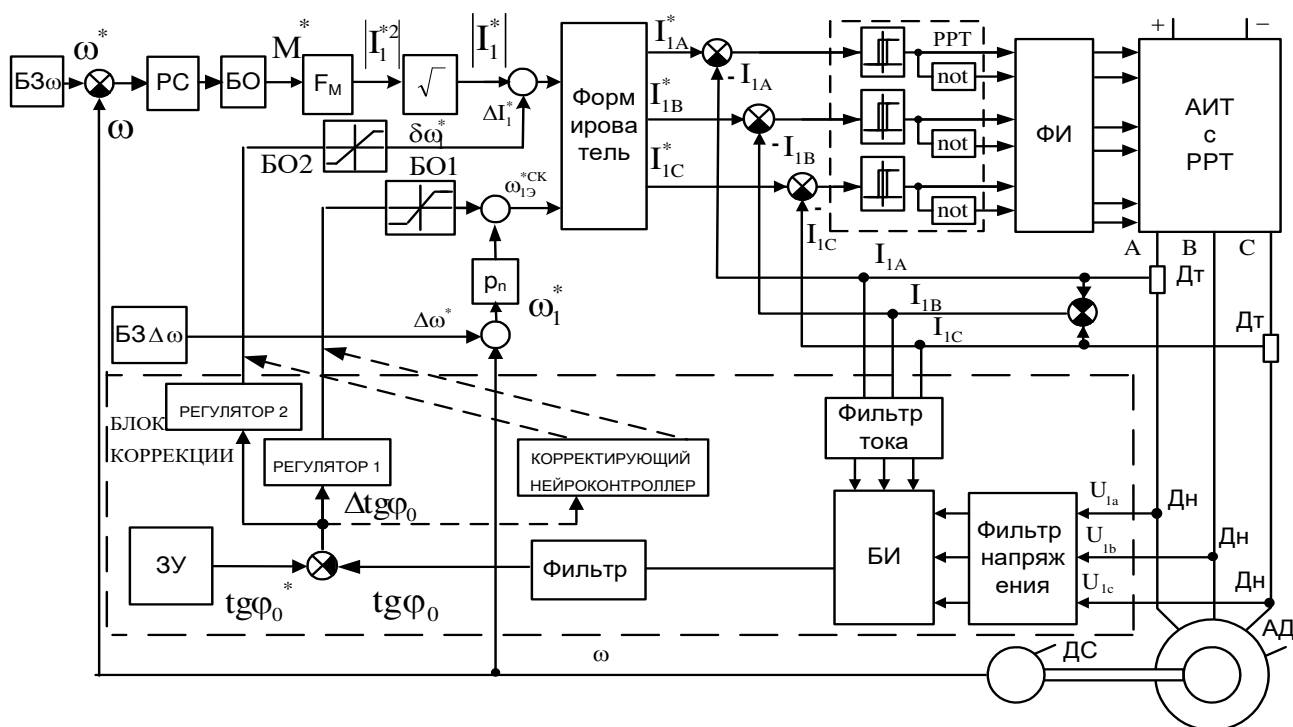


Рисунок 3 – Функциональная схема асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением с коррекцией сигналов частоты и амплитуды

В схеме (рисунок 3) использована одна из разработанных систем идентификации $\text{tg}\varphi_0$ (БИ) с помощью наблюдателя, встроенного в систему управления, обрабатывающего отфильтрованные измеренные сигналы мгновенных значений фазных напряжений и токов статора и определяющего значение

$$\text{tg}\varphi_0 = \frac{U_1 \cos\varphi - I_1 X_{1(\omega)}}{U_1 \sin\varphi - I_1 R_1}. \quad (8)$$

Электропривод, выполненный на базе инвертора тока с релейными регуляторами фазных токов (PPT), содержит двухканальную систему коррекции сигналов задания амплитуды и частоты тока статора на основе измерения тока и напряжения статора. При синтезе системы управления был предложен следующий подход. В прямом канале управления используется математическая модель АД, справедливая для статического режима при фиксированном значении $\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}$. Нелинейное динамическое звено F_M (таблица 1), описывается упрощенным выражением для статического режима $F_M^{\text{СТ}}$.

Таблица Передаточные функции и параметры элементов системы управления

| Нелинейное звено | Замкнутый контур регулирования тока | Регулятор скорости |
|---|--|--|
| $F_M(p) = \frac{3p_n L_m^2}{2 L_2'} \frac{1}{\left(\frac{1}{T_{э\tau} \Delta\omega_{эл}}\right)(T_{э\tau} p + 1)^2 + (T_{э\tau} \Delta\omega_{эл})}$ $F_M^{ст} = \frac{T_{э\tau} \Delta\omega_{эл}}{1 + (T_{э\tau} \Delta\omega_{эл})^2} = \frac{\text{tg}\varphi_0'}{1 + (\text{tg}\varphi_0')^2}$ | $W_{зАМК}(p) = \frac{1}{1 + T_\mu \cdot p},$ $T_\mu = 1/f_k$ | $W_{PC}^{II}(p) = \frac{J}{2T_\mu k_c};$ $W_{PC}^{III}(p) = \frac{(1 + 4T_\mu p)J}{8pT_\mu^2}$ |

Снижение амплитуды колебаний и стабилизация момента АД достигаются с помощью дополнительных встречно-параллельных корректирующих устройств. Сигнал коррекции, подаваемый по каналу регулирования частоты, определяется по формуле

$$\delta\omega = \frac{\Delta \text{tg}\varphi_0' \cdot R_2'}{L_2'}. \tag{9}$$

Сигнал коррекции, подаваемый по каналу регулирования амплитуды тока устанавливается путем настройки системы коррекции. Нейроконтроллер после обучения вырабатывает динамические корректирующие сигналы, поступающие в каналы задания частоты и амплитуды тока статора.

В четвертой главе выполнен анализ аппарата нейронных сетей, изучены возможности его применения для моделирования и управления электроприводами, проведен выбор структур нейронных сетей, наиболее подходящих для управления электроприводами, разработаны нейросетевые модели и системы управления электроприводом постоянного тока. Показано, что многослойная нейронная сеть выполняет в динамической системе управления функцию адаптивного регулятора (контроллера) объекта, при этом нейронная сеть в процессе обучения одновременно формирует оптимальное в смысле минимальности требуемой целевой функции управляющее воздействие на входе исполнительного устройства системы. На экспериментальной установке с электроприводом постоянного тока (рисунок 4, а) и математической модели исследована нейронная сеть прямого распространения с динамической памятью, которая может быть применена в качестве нейроконтроллера. Исследованы динамические режимы электропривода постоянного тока с нейросетевыми системами инверсно-прямого и адаптивного косвенного

управления (рисунок 4, б). Экспериментальные настройки систем электропривода постоянного тока с нейросетевым регулятором скорости, показали, что наибольшее быстродействие при близком к апериодическому характере переходного процесса достигаются в системе с адаптивным косвенным нейруправлением.

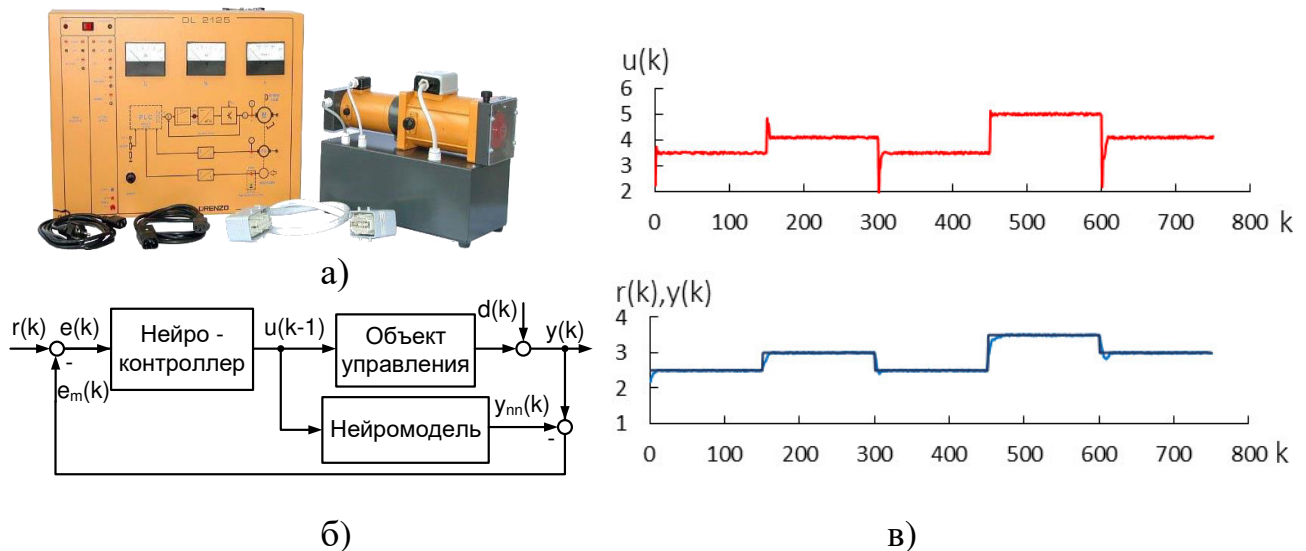


Рисунок 4 – Экспериментальное исследование нейросетевого управления ЭП постоянного тока: а – экспериментальная установка DE Lorenzo; б – схема нейросетевого управления; в – графики изменения скорости при нейросетевом адаптивно-косвенном управлении

Для электроприводов постоянного и переменного тока были реализованы схемы подражающего и инверсно-прямого управления на базе модели нелинейной авторегрессии со скользящим средним NARMA-L2.

Функциональная схема реверсивного электропривода постоянного тока с внутренним контуром релейно-гистерезисного регулирования тока якоря и внешним контуром регулирования скорости на базе ПИ- или нейросетевого регулятора приведена на рисунке 5, схема математической модели - на рисунке 6.

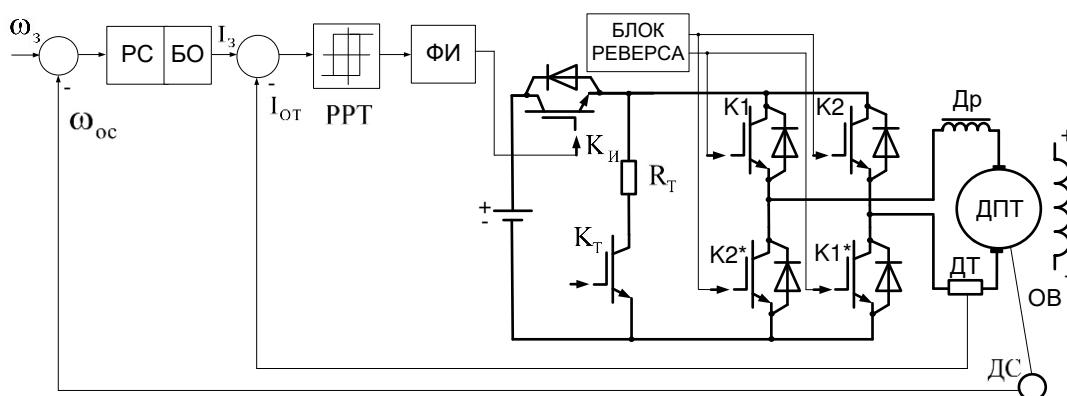


Рисунок 5 – Функциональная схема электропривода постоянного тока

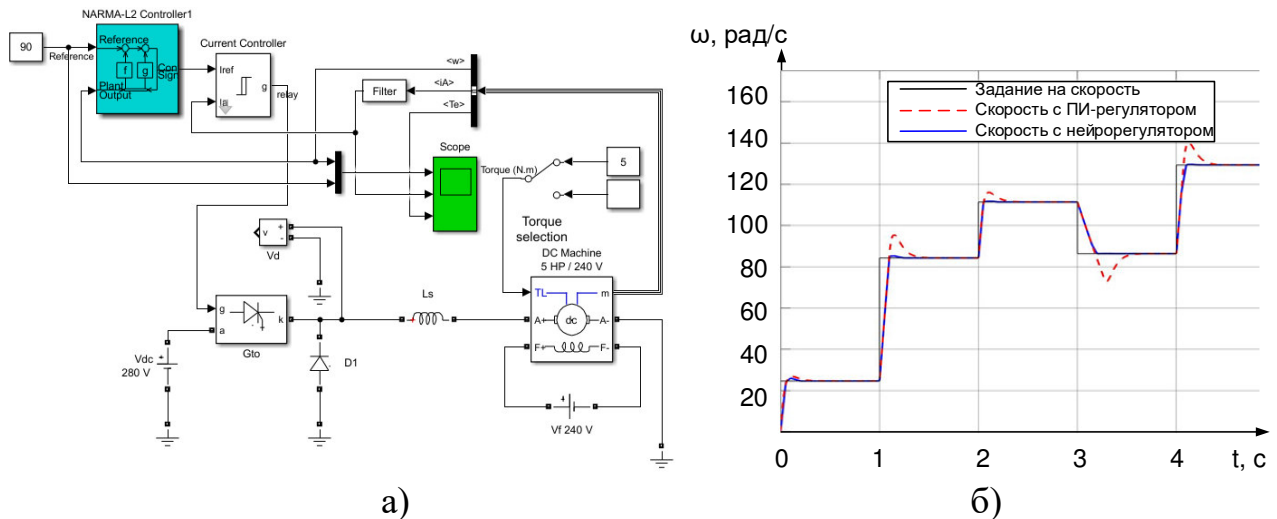


Рисунок 6 – Математическое моделирование ЭП постоянного тока: а – блок-схема модели нереверсивного ЭП; б – графики сигнала задания и $\omega = f(t)$, в ЭП с ПИ- и нейрорегулятором скорости

В системе с ПИ-регулятором скорости имеется перерегулирование по скорости, а при использовании нейрорегулятора перерегулирования нет.

Системы асинхронного электропривода с векторным и скалярным управлением исследовались на испытательном стенде (рисунок 7) и методом математического моделирования.

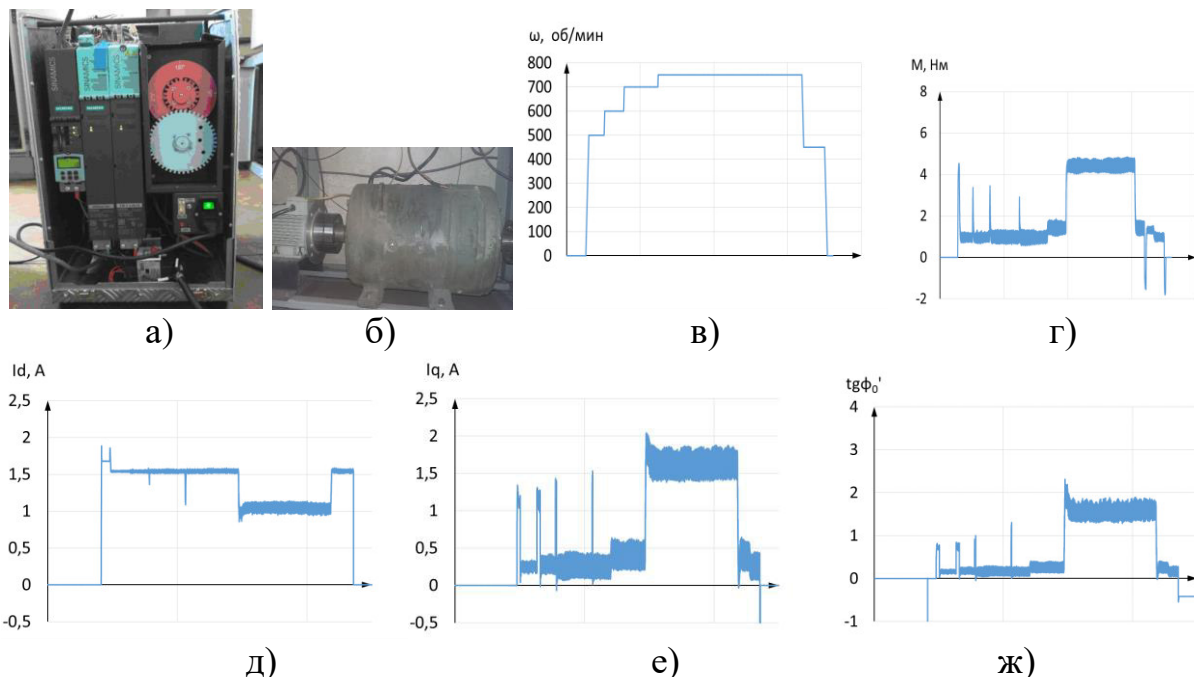


Рисунок 7 – Экспериментальные исследования асинхронного электропривода с векторным управлением: а – шкаф SINAMICS S120; блок двигателей АД – ДПТ; в – график $\omega_0 = f(t)$; г – график $M = f(t)$; д – график $I_d = f(t)$; е – график

$$I_d = f(t); \text{ ж - график } \operatorname{tg}\varphi'_0 = f(t)$$

Исследовался электропривод, содержащий АД АИР71В4УЗ, ПЧ SINAMICS S120, записывались графики изменения во времени: скорости, момента, проекций I_d , I_q , рассчитывался $\operatorname{tg}\varphi'_0$. Графики, приведенные на рисунке 7, показывают, что угол φ'_0 и $\operatorname{tg}\varphi'_0$ в типовой системе не стабилизируются, и изменяется в широких пределах при изменении нагрузки на валу двигателя. В ходе экспериментов были также получены графики изменения во времени других переменных - сигнала задания на скорость, частоты тока статора, тока статора. Экспериментальные исследования показали, что для реализации энергоэффективных режимов и улучшения динамических свойств в асинхронных электроприводах мобильных роботов, построенных на базе типовых преобразователей частоты, необходимо применять дополнительные корректирующие устройства. Результаты экспериментов подтвердили результаты аналитических исследований и математического моделирования.

Математическое моделирование асинхронного электропривода с векторным управлением (рисунок 2) показало, что при применении нейросетевого регулятора скорости, при набросе и сбросе нагрузки нет просадок во временном графике скорости (рисунок 8, а), при ступенчатом изменении сигнала задания характер изменения скорости близок к апериодическому, как и в электроприводе постоянного тока.

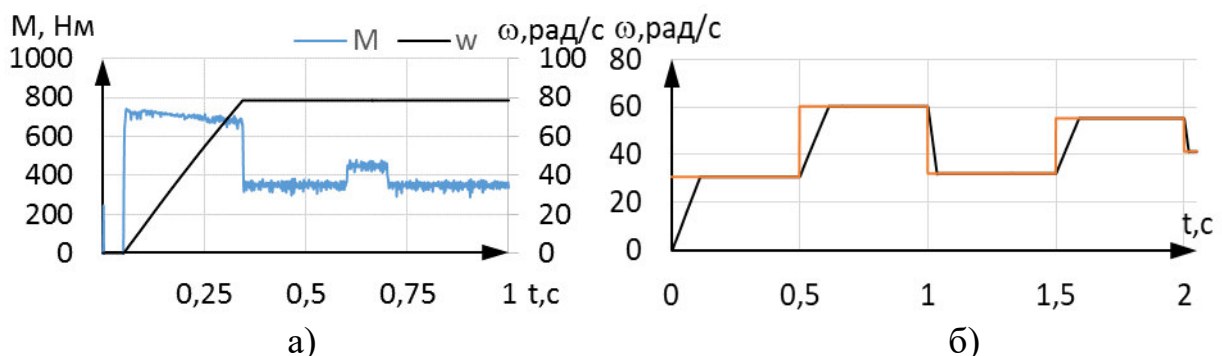


Рисунок 8 – Векторное управление АД с нейросетевым регулятором скорости: а – $M = f(t)$ и $\omega = f(t)$ при пуске, набросе и сбросе нагрузки; б – изменение скорости при изменении сигнала управления

Разработанная система коррекции задания продольной составляющей

тока статора в асинхронном электроприводе с векторным управлением (рисунок 2) обеспечивает снижение отношения «ток статора / момент» в среднем на 5%.

На математической модели были получены графики процесса пуска системы асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением (рисунок 3), при отсутствии системы коррекции (рисунок 9, а) и при использовании корректирующего нейроконтроллера (рисунок 9, б, 9, в, 9, г).

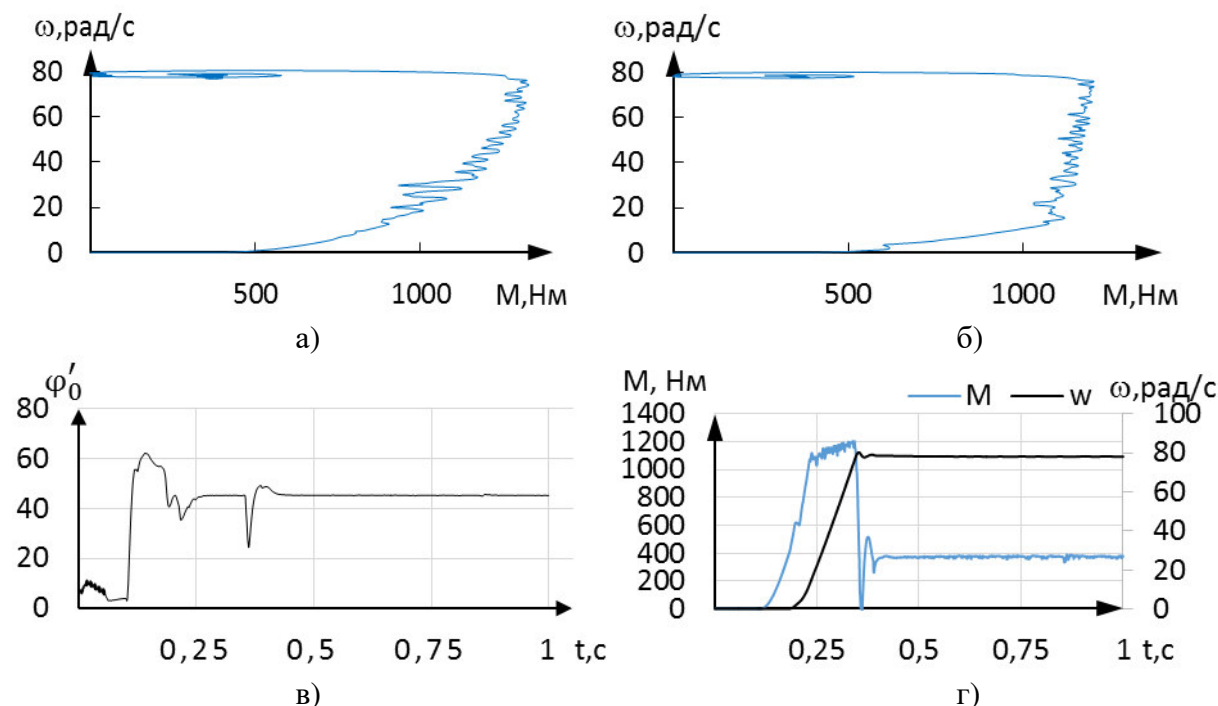


Рисунок 9 – Пуск асинхронного электропривода со скалярным управлением:
 а - $\omega(t) = f[M(t)]$ без коррекции; б - $\omega(t) = f[M(t)]$; в - $\phi'_0 = f(t)$; г - $\omega = f(t)$ и $M = f(t)$ - с нейросетевым корректирующим звеном

Результаты математического моделирования показывают, что нейросетевая коррекция системы частотно-токового управления АД обеспечивает приемлемую для электропривода мобильных роботов стабилизацию момента двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения в совокупности представляющие собой научные достижения в области нейросетевого управления электроприводами передвижения мо-

бильных роботов. При этом решена научная задача и обоснованы технические и конструктивные параметры новых технических решений, имеющих важное хозяйственное значение. Полученные материалы диссертации позволяют сформулировать следующие выводы.

1. На основании сравнительного анализа системы управления с нейроконтроллером, включенным только в прямой канал управления, и системы с косвенным управлением, в которой нейронная сеть используется как модель системы, установлено, что система с косвенным управлением имеет большую надежность, низкую чувствительность к шуму и редкую частоту сбоев, что позволят выбрать ее в качестве наиболее приемлемого варианта построения нейроконтроллеров, управляющих скоростью электропривода и коррекцией пусковых характеристик. Для моделирования динамических процессов выбрана система, работающая на основе модели авторегрессии со скользящим средним.

2. Разработана и исследована унифицированная система нейросетевого управления скоростью электроприводов мобильных роботов, построенных на базе двигателя постоянного тока, и асинхронным двигателем с векторным управлением, обеспечивающая пуск электропривода с постоянным моментом, отсутствие перерегулирования по скорости при пуске и регулировании скорости электропривода.

3. Выполнен структурно-топологический анализ векторной модели асинхронного двигателя и исследованы возможности повышения его устойчивости в системах частотного электропривода за счет применения корректирующих средств, доказано, что для подавления колебаний переменных в электромагнитной системе двигателя, необходима одновременная коррекция амплитуды тока статора и скольжения двигателя, направленная на стабилизацию взаимного положения векторов тока статора и потокосцепления ротора.

4. Разработаны системы идентификации взаимного положения моментобразующих векторов переменных асинхронного двигателя, позволяющие

вырабатывать входные сигналы для блоков нейросетевой коррекции асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением.

5. Разработана и исследована система частотно-токового управления асинхронным двигателем с использованием нейросетевых корректирующих средств, обеспечивающих улучшенные пусковые характеристики электропривода со стабилизацией пускового момента, что делает этот электропривод конкурентоспособным при использовании на мобильных роботах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Мещеряков В.Н. Система частотного асинхронного электропривода, обеспечивающая взаимную ориентацию моментобразующих векторов / В.Н. Мещеряков, В.А. Корчагина, О.В. Мещерякова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. №3. 2010 с. 31-36.

2. Мещеряков В.Н. Оптимизация взаимного положения векторов тока статора и главного потокосцепления асинхронного двигателя при векторном управлении / В.Н. Мещеряков, В.С. Черкасова, О.В. Мещерякова // Вести вузов Черноземья. 2011. №2. с.45-49.

3. Мещеряков В.Н. Системы частотно-каскадного асинхронного электропривода, выполненные на базе инвертора напряжения / В.Н. Мещеряков, А.М. Башлыков, В.А.Зотов, О.В. Мещерякова // Вести вузов Черноземья. 2011. №4. с.21-25.

4. Мещеряков В.Н. Асинхронный электропривод с поддержанием оптимального угла между моментобразующими векторами / В.Н. Мещеряков, П.Е. Цветков, О.В. Мещерякова // Вести вузов Черноземья. 2013. №1. С.17-21.

5. Мещеряков В.Н. Математическое моделирование и управление процессами в системах автоматизации промышленных установок с помощью многозначных нейронных сетей / В.Н. Мещеряков, П.В. Сараев, О.В. Мещерякова // Проблемы управления. 2013. №6, с.71-73.

6. Meshcheryakov V.N. Mathematical vector model of induction motor and structural-topological analysis of the model / V.N. Meshcheryakov, O.V. Meshcheryakova // Вести вузов Черноземья. 2014. №2. с. 19-22.

7. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, №3(61), 2015. с. 36-38.

публикация в издании из базы СКОПУС

8. Marco Correia , Olga Meshcheryakova , Pedro A. C. Sousa , Jorge Cruz : Probabilistic Constraints for Robot Localization. Progress in Artificial Intelligence - 17th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, {EPIA} 2015, Coimbra, Portugal, September 8-11, 2015. Proceedings. p. 480-486.

Другие публикации

9. Мещерякова О.В. Применение многозначных нейронных сетей / Материалы 9-й Всероссийской школы конференции молодых ученых "Управление большими системами". т.2. Липецк. 21-24 мая 2012. с.58-59.

10. Мещерякова О.В. Нейронные сети и их применение в системах электропривода и автоматизации промышленных установок Материалы региональной научно-технической конференции «Автоматизация и роботизация технологических процессов» Воронеж. 16-17 ноября 2012 г. с. 14-16.

11. Мещерякова О.В. Применение нейронных сетей для управления электроприводом постоянного тока / Материалы 11-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии" Нижний Новгород. 17.04.2015. с.156.

12. Мещерякова О.В. Применение нейронных сетей для управления мобильными роботами / Материалы 12-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии". Нижний Новгород. 22.04.2016. с.210.

13 Мещерякова О.В. Построение модели нейросетевой системы управления электроприводом постоянного тока / Материалы 13-й Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии" Нижний Новгород. 21.04.2017. с.251-255.

14. Мещеряков В.Н. Математическая векторная модель и структурно-топологический анализ асинхронного двигателя / В.Н. Мещеряков, О.В. Мещерякова // Сборник научных трудов Международной научно-технической

конференции Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии. Липецк. 2012. с.171-175.

15. Мещеряков В.Н. Системы скалярного и векторного управления частотными электроприводами с релейным регулятором тока / В.Н. Мещеряков, А.М. Башлыков, А.С. Абросимов, М.М. Лосихин, О.В. Мещерякова // Труды 7-й Международной конференции АЭП 2012. Иваново 2-4 октября 2012. с.37-41.

16. Мещеряков В.Н. Коррекция частотного асинхронного электропривода / В.Н. Мещеряков, О.В. Мещерякова // Материалы Международной научно-технической конференции "Проблемы повышения эффективности электро-механических преобразователей в электроэнергетических системах" Севастополь, 14-19.09.2014. с.47-48

17. Абросимов А.С. Система управления асинхронным электроприводом с помощью автономного инвертора тока с релейным регулятором / А.С. Абросимов, В.Н. Мещеряков, О.В. Мещерякова Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции "Современная металлургия начала нового тысячелетия" . 17-21.11.2014. Ч.2, с.88-93.

18. Мещеряков В.Н. Система управления асинхронным электроприводом на базе автономного инвертора тока с релейным регулятором напряжения / В.Н. Мещеряков, О.В. Мещерякова // Электротехнические системы и комплексы: Международный сборник научных трудов. Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2013. – с. 130-137.

19. Мещеряков В.Н. Система векторного управления асинхронным электроприводом, применяемым в металлургии / В.Н. Мещеряков, О.В. Мещерякова, Д.В. Ласточкин // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции «Металлургия нового тысячелетия». Ч.1. Липецк. 8-10 декабря 2015 г. с.120 -124.

20. Мещеряков В.Н. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода / В.Н. Мещеряков, А.М. Башлыков, А.А. Муравьев, О.В. Мещерякова // Труды 16-й Международной научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока". Екатеринбург. 05.09.15. с.175-178.

21. Мещеряков В.Н. Вентильный электропривод для робототехнических систем с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора / В.Н. Мещеряков, В.Н. Воеков, О.В. Мещерякова //Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МПКУ-2017. с. Дивноморское. Геленджик. 11-16 сентября 2017. с. 167 - 171.

Патенты

22. Патент № 2447573. Электропривод переменного тока. Мещеряков В.Н., Зотов В.А., Мещерякова О.В. Заявл. 02.11.10. Опубл.10.04.12. Бюл №10.

23. Патент № 2512873. Электропривод переменного тока Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Мещерякова О.В. Заявл.09.01.13. Опубл.10.04.14. Бюл. №10.

24. Патент № 2528612. Электропривод переменного тока. Мещеряков В.Н., Бойков А.И. Мещерякова О.В. Заявл. 26.12.12. Опубл.10.07.14. Бюл. №19.

25. Патент № 2539347 Способ управления автономным асинхронным двигателем Мещеряков В.Н., Мещерякова О.В. Заявл.26.07.13. Опубл. 20.01.15. Бюл. №2.

26. Патент РФ №2582202 Электропривод переменного тока. Мещеряков В.Н., Мещерякова О.В. Опубл.20.04.16 Бюл. №11.

27. Патент РФ №132282 на полезную модель. Устройство для управления асинхронным двигателем с фазным ротором. Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Мещерякова О.В. Заявл. 09.01.2013. Опубл. 10.09.2013. Бюл №25.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: разработка математических моделей асинхронного электропривода [1,2,4,7,17]; анализ нейросетевых систем управления [5]; составление структурной модели, ее преобразование и анализ [6,14]; исследование системы локализации мобильного робота [8]; разработка систем коррекции асинхронных электроприводов [7,16]; анализ и математическое моделирование асинхронных электроприводов с релейными регуляторами [3, 15, 18,19,20,21], разработка алгоритмов управления, наблюдателей и корректирующих устройств для асинхронных электроприводов [22,23,24,25,26,27].