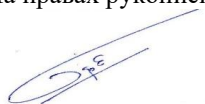


На правах рукописи



Йе Наунг

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЧАСТОТНО-
РЕГУЛИРУЕМЫХ СЕРВОПРИВОДОВ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ
СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.13.06 — «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(в приборостроении)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в институте "Микроприборов и систем управления" Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Научный руководитель: **Щагин Анатолий Васильевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кобзарь Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор, советник
генерального директора ЗАО «НТЦ ЭЛИНС»

Красовский Андрей Александрович
кандидат технических наук,
руководитель проектов ООО
“Интеллектуальные системы управления
бизнесом”

Ведущая организация: **ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения».**

Защита диссертации состоится «17» сентября 2020 г. В 14 ч.30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.134.04 при Национальном исследовательском университете «МИЭТ» по адресу: 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, д. 1, НИУ МИЭТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭТ и на сайте <http://miet.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.134.04,

д.т.н., профессор  **А. А. Шерченков**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Технологии развития силовой электроники и электропривода являются очень сложной и многопрофильной областью, и за последние несколько десятилетий они претерпели динамичную эволюцию благодаря многочисленным изобретениям в области силовых преобразователей и регуляторов электрической энергии, методов управления, электрических машин, приводов двигателей, силовых полупроводниковых приборов, а также развитию методов усовершенствованного управления и моделирования. В последние годы границы силовой электроники продвинулись еще дальше с появлением методов искусственного интеллекта (ИИ), таких как экспертные системы, системы нечеткой логики, нейронные сети и генетические алгоритмы (или эволюционные вычисления). Среди всех методов искусственного интеллекта нейронные сети стали наиболее важной областью для идентификации, управления и оценки сложных систем в силовой электронике и двигательных приводах. В будущем они, как ожидается, получат широкое применение в промышленности.

Их основные преимущества: высокий параллелизм структуры, способность к обучению, отказоустойчивость и эффективная реализация СБИС для приложений реального времени в значительной степени мотивируют использование нейронных сетей в идентификации и управлении нелинейными системами. Во многих реальных приложениях существует множество нелинейностей, не моделируемой динамики, шумов, многоконтурности и т. д., которые создают проблемы при реализации стратегий управления.

При применении таких методов, разработка математических моделей является приоритетной задачей, решение которой позволит моделировать и реализовывать высокоточные системы управления положением и скоростью при создании электромеханических систем нового поколения.

В системах управления использование технологий искусственных нейронных сетей (ИНС) относится к разработкам со сложной структурой, которые можно использовать в качестве построения интеллектуальных контроллеров и идентификации любого объекта. Во многих промышленных приложениях наиболее часто используется пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы, которые широко используются в управлении с обратной связью в

промышленных процессах. Очень важным фактором в промышленных применениях ПИД регуляторов, является выбор коэффициентов при реализации функций нелинейного управления и управления объектами с изменяющимися параметрами. Для сокращения времени настройки и улучшения характеристик регуляторов могут применяться традиционные контроллеры, реализующие функции самонастраивающихся ПИД - регуляторов, однако в настоящее время представляет большой исследовательский интерес искусственная нейронная сеть из-за её способности к параллелизации и способности к обучению, позволяющая строить интеллектуальные регуляторы.

Таким образом, разработка структур, исследование режимов работы частотно-регулируемых сервоприводов для систем точного позиционирования, анализ методов управления при использовании различных типов электродвигателей, разработка математических моделей, новых алгоритмов управления режимами работы серводвигателей и реализация систем управления на основе скалярного и векторного методов с использованием нейро-сетевых регуляторов и реализация управления с прогнозирующими моделями, позволят обеспечить повышение точности, производительности, эффективности и качественно новые характеристики устройств.

Эти вопросы, составляющие предмет данной работы, вполне актуальны.

Цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов, систем и алгоритмов управления режимами серводвигателей, обеспечивающих повышение эффективности и надежности работы частотно-регулируемых сервоприводов для высокоточных систем позиционирования.

Поставленная цель достигается благодаря решению следующих основных задач:

- 1) анализ характеристик и особенностей сервоприводов постоянного и переменного тока;
- 2) анализ структур управления серводвигателями постоянного и переменного тока;
- 3) разработка методов управления, с целью повышения точности, эффективности и надежности работы частотно-регулируемых сервоприводов;
- 4) создание математических моделей систем управления асинхронным двигателем с использованием векторных методов;

- 5) разработка и анализ алгоритмов и особенностей регулирования скорости и положения вала серводвигателей;
- 6) создание математических моделей систем управления серводвигателями с использованием нейро-сетевых регуляторов;
- 7) синтез регуляторов серводвигателей на основе нейро-сетевого регулятора;

Методы исследований. Поставленные задачи решались путем теоретических и экспериментальных исследований. Для решения поставленных задач в диссертации использованы: методы математического анализа, математического моделирования, методы векторного управления, теория автоматического регулирования и методы управления серводвигателями на основе нейро-сетевых регуляторов.

Научная новизна диссертации состоит в создании, проведении и реализации следующих научно-обоснованных разработок:

1. Предложены математические модели, алгоритмы управления и структурные схемы систем управления двигателями постоянного и переменного тока с обратной связью по скорости и по положению, которые обеспечивают постоянство скорости и положение в заданном диапазоне моментов, применяемые для высокоточных системах позиционирования.
2. Разработана структурная схема нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора с использованием адаптивного управления с эталонной моделью в системе управления, которая позволяет оптимизировать время настройки ПИД регулятора и повышает эффективность и надежность частотно-регулируемых сервоприводов.
3. Разработана система управления положением вала двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика пропорционально-интегрального регулятора (ПИ) для высокоточных систем позиционирования, обеспечивающая по сравнению с классическим регулятором повышение точности положения, уменьшение перерегулирования и время установления.
4. Разработана структурная схема микропроцессорной системы управления сервоприводами с использованием программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ), в результате чего ППВМ позволяют проектировать

сложные приводные системы управления двигателями на основе нейронной сети.

Практическая и теоретическая значимость работы:

1. Разработаны математические модели систем управления режимами работы двигателей постоянного и переменного тока при различных нагрузках.
2. Результаты моделирования и алгоритмы управления режимами двигателей постоянного и переменного тока для высокоточных систем позиционирования металлообрабатывающих станков.
3. Разработаны структурные и функциональные схемы системы управления с использованием векторного управления двигателем для высокоточных систем позиционирования.
4. Разработана математическая модель систем управления двигателем постоянного и переменного тока на основе нейро-сетевого регулятора.
5. Разработана микропроцессорная система управления двигателем постоянного тока с использованием ПИД регулятора.
6. Разработана микропроцессорная система управления асинхронным двигателем с использованием программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ).

Достоверность новых научных результатов подтверждена математическим обоснованием полученных результатов и компьютерным моделированием, а также высокой степенью совпадения результатов математического и физического моделирования.

Личный вклад автора.

Все основные научные результаты, а именно математические модели, структурные схемы, алгоритмы и результаты численных расчетов получены и исследованы автором лично.

На защиту выносятся:

1. Реализация нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора.
2. Методы управления положением вала двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с помощью нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора.
3. Функциональная схема и микропроцессорная система управления современным сервоприводом.
4. Модель и результаты моделирования управления положением вала двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора для высокоточных систем позиционирования.

5. Сравнительные результаты моделирования двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя с использованием ПИ-регулятора и нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и межвузовских научных конференциях:

1. 22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015». -М.: МИЭТ, 22 – 24 апреля 2015 года. С. 222
2. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 19-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука» с 1 октября по 10 декабря 2015 года. С. 66-66а
3. 23-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2016»-М.: МИЭТ, 20 – 22 апреля 2016 года. С.198
4. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. 978-1-5090-4865-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE C. 998-1002
5. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. 978-1-5090-4865-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE C. 869-872
6. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. 978-1-5090-4865-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE C. 1091-1093
7. 24-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2017». М.: МИЭТ, 19 – 20 апреля 2017 года. С. 190
8. 25-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2018». -М.: МИЭТ, 18 – 19 апреля 2018 года С. 127
9. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian. C. 1801-1804
10. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian. C. 1805-1807

Публикации по работе. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 3 работы в журналах, входящих в список, утвержденный ВАК и 6 работ в международной реферативной базе данных SCOPUS, а также 1 статья и 5 тезисов докладов на российских и международных конференциях, входящих в систему цитирования РИНЦ. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 70 наименований, 3 приложений и 1 акта использования результатов диссертационной работы. Работа содержит 160 страниц, из них -143 страницы основного текста и 10 страниц приложения, 95 рисунков и 8 таблиц.

Содержание работы.

Во введении проведен анализ проблем, связанных с созданием систем управления сервоприводами, показаны актуальность темы диссертации, цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, апробация, приведено краткое содержание по главам.

В первой главе Проведен анализ структурной схемы управления скоростью серводвигателя постоянного тока и управления объектом с обратной связью по скорости и току в цифровом виде и показано, что применение современных методов управления двигателем постоянного тока с использованием симметричного оптимального настройщика ПИ-регулятора позволяет обеспечить увеличение производительности и надежности системы, широкий диапазон регулирования, стабилизацию момента вращения, перегрузочную способность и высокую динамику. Проведенный анализ особенностей управления серводвигателем показал, что серводвигатель переменного тока обеспечивает управление положением, скоростью, моментом, с достаточной точностью движения и динамикой. На основании проведенных исследований показано, что серводвигатели постоянного тока и асинхронные двигатели подходят для реализации перемещения очень тяжелых инерционных нагрузок, а серводвигатели постоянного тока больше подходят для быстрого позиционирования более легких инерционных нагрузок.

Определены основные процессы и факторы, влияющие на эффективность системы.

Во второй главе разработаны математические модели асинхронного двигателя и приведены уравнения физической модели асинхронного двигателя переменного тока в системе $\alpha\beta$ координат и в системе dq координат, обеспечивающие постоянство момента, в заданном диапазоне скоростей, применяемых в сервоприводах для высокоточных систем позиционирования. Предложена имитационная модель асинхронного двигателя с использованием Simscare, которая позволяет быстро создавать модели физических систем в среде SIMULINK и моделировать такие системы, как электроприводы, электродвигатели, мостовые выпрямители, собирая фундаментальные компоненты в схему. С помощью Simscare можно строить модели физических компонентов на основе физических связей, которые непосредственно интегрируются с структурными схемами и другими парадигмами моделирования. На основании проведенных исследований показано, что имитационная модель позволяет получить возможность быстрой модификации модели системы без уравнений системы для сложной модели, такие как, модели управления положением вала асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора.

В главе рассматриваются переходные процессы с разомкнутым контуром на основе математической модели и имитационной модели с идентичным входным сигналом usd и usq . Электрическая модель основана на модельных уравнения, представленных в формате модели пространства состояний следующим образом:

$$\dot{x}_m(t) = A_m(\omega_s, \omega_e)x_m(t) + B_mu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = C_mx_m(t) \quad (2)$$

Где

$$A_m(\omega_s, \omega_e) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_\sigma} & \omega_s(t) & \frac{k_r}{r_\sigma \tau_r \tau_\sigma} \\ -\omega_s(t) & -\frac{1}{\tau_\sigma} & \frac{k_r}{r_\sigma \tau_\sigma} \omega_e(t) \\ \frac{L_h}{\tau_r} & 0 & -\frac{1}{\tau_\sigma} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B_m = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_\sigma \tau_\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_\sigma \tau_\sigma} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где начальное условие определяется как $x_m(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$, и $\omega_e(0) = 0$ в начальной точке.

Механическая модель выводится на основе дифференциального уравнения, которое содержит одно билинейное условие $\psi_{rd}(t) \times i_{sq}(t)$, другой входной условие помещения $T_L(t)$. Таким образом, уравнение реализации получается, как:

$$\omega_r(t_i) = \omega_r(t_i - \Delta t) + \Delta t \left(-\frac{f_d}{J_m} \omega_r(t_i - \Delta t) + \frac{3}{2} \frac{Z_p L_h}{L_r J_m} \psi_{rd}(t_i - \Delta t) i_{sq}(t_i - \Delta t) - T_L \right) \quad (5)$$

где нулевое начальное условие также определяется, как $\omega_e(0) = 0$.

Модель для оценки скольжения разработана для оценки угловой скорости в dq координатах. Оценка получена из модельного уравнения, в момент выборки t_i как:

$$\omega_s(t_i) = \omega_e(t_i) + \frac{L_h}{\tau_r} \frac{i_{sq}(t_i)}{\psi_{rd}(t_i)} \quad (6)$$

Поток ротора $\psi_{rd}(t_i)$ включен в качестве знаменателя, чтобы обеспечить стабильность модели, $\psi_{rd}(t_i) \neq 0$. Поэтому установлена реализация математической модели в координатах dq, при постоянных входных значениях $u_{sd}(t)$ и $u_{sq}(t)$, модель асинхронного двигателя в dq-координатах на рис.1, а результаты переменных состояния представлены на рис. 5(a).

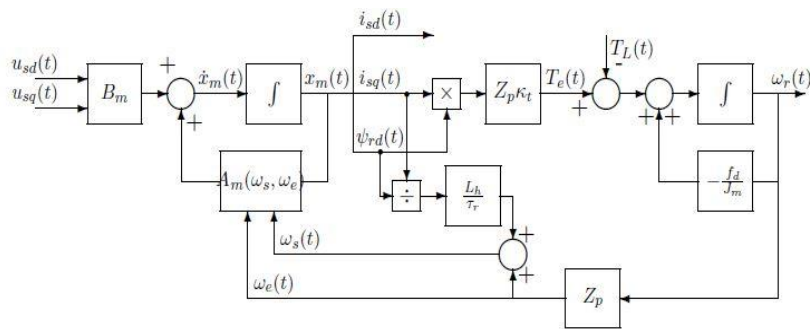


Рис 1. Модель асинхронного двигателя в dq-координатах

Результаты моделирования получены с использованием MATLAB Simulink. В главе реализована модель разомкнутого контура для получения переменных состояния. Схема модели в Simulink приведена на рис.2 , где модель асинхронного двигателя выбирается из набора инструментов SimPower, а также инверторного блока IGBT. Определяя входные сигналы u_{sd} и u_{sq} , в качестве результатов получены четыре переменные состояния. Детали реализации включают в себя: широтно-импульсная модуляция (ШИМ) имеет несущую частоту 2 кГц, напряжение звена постоянного тока 520 В и нулевая нагрузка на вал двигателя чтобы сохранить простоту теста разомкнутого контура, угол положения dq координата определяется независимо на частоте 25 Гц (т.е. $\omega = 157,0796$ рад / с). Результаты моделирования представлены на рис. 3(б).

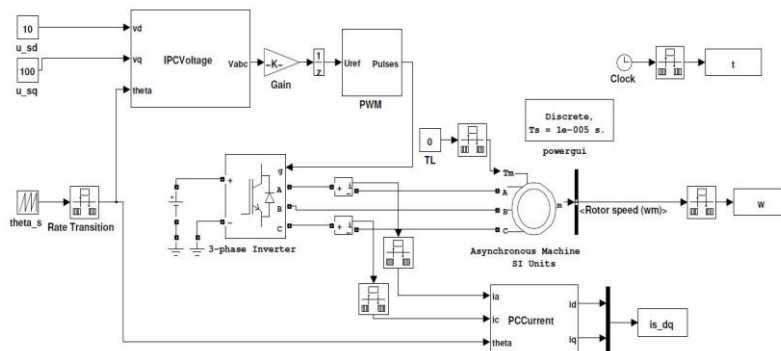


Рис 2. Модель асинхронного двигателя в среде Matlab/Simulink

Определяя входные сигналы, такие как $us_d = 10V$ и $us_q = 100V$. На рис.3 представлены результаты моделирования управления разомкнутым контуром на основе нелинейной математической модели и имитационной модели SimPower. На рис. 3(a) показан результат моделирования нелинейной математической модели, где видно, что результат является почти одинаковым по сравнению с имитационной моделью, поскольку все моделирования реализованы на основе координаты dq.

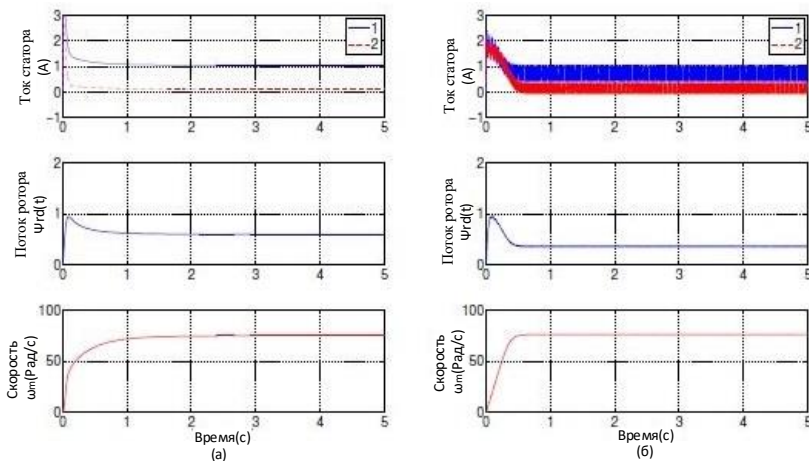


Рис 3. Результаты моделирования управления разомкнутым контуром на основе нелинейной математической модели и имитационной модели SimPower

В третьей главе предложен и реализован метод повышения точности квадратурного инкрементального энкодера в электроприводах, который позволяет уменьшить влияние квантования и относительных погрешностей и получить высокие разрешения в качестве датчика обратной связи для измерения скорости и положения при использовании низкого разрешения датчика.

Разработана микропроцессорная система управления двигателем постоянного тока, которая позволяет поддерживать практические работы при построении точных систем позиционирования. Благодаря своим динамическим характеристикам и высокой эффективности, их используют в большинстве роботов на сборочных конвейерах и можно решить проблему «недостающего шага» в 3D-принтерах применением

двигателей постоянного тока с замкнутым контуром цифрового управления.

Рассмотрено применение протокола CAN для реализации канала управления режимами работы микропроцессорной системы сервоприводов и приложений, требующих большого количества коротких сообщений с высокой надежностью в надежных операционных средах. Реализовано управление двигателем постоянного тока с использованием процесса идентификации, которая позволяет построить математические модели динамических систем на основе наблюдаемых системных данных. Для формирования управляющего воздействия используется цифровой ПИД-регулятор. Определение положения вращения и вывод информации на индикатор происходит каждый раз по приходу сигнала с энкодера.

На практике для управления двигателем постоянного тока с замкнутым контуром используется микроконтроллер Atmega 329, драйвер L298N, LCD-дисплей и энкодер (датчик угла). Программирование микроконтроллера Atmega328 осуществляется на языке Си.

В четвертой главе предложена модель нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора и структурная схема нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора с использованием адаптивного управления с эталонной моделью в системе управления, которые позволяют оптимизировать времени настройщика ПИД регулятора и эффективности и надежности. Разработана система управления двигателем постоянного тока с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора, которая может использоваться в современных сервоприводах постоянного тока для высокоточных систем позиционирования легких инерционных нагрузок. Предложен алгоритм нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора для управления асинхронным двигателем. Разработана система управления положением вала асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора, которая может использоваться в современных сервоприводах переменного тока для высокоточных систем позиционирования тяжелых инерционных нагрузок. Разработаны функциональная и структурная схемы микропроцессорной системы с частотно-регулируемыми сервоприводами на программируемых пользователями вентильных матрицах (ППВМ). Структурная схема нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора приведена на рис. 4. Веса нейронной сети рассчитываются для минимизации критерия с использованием метода

градиента. Используемый критерий - минимизация квадратичной ошибки модели:

$$J = \frac{1}{2}e^2 = \frac{1}{2}(y - y_m)^2 \quad (7)$$

где y - выход объекта, а y_m - выход эталонной модели.

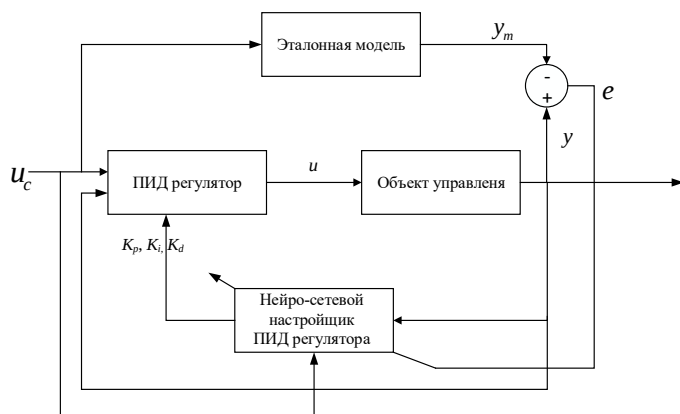


Рис.4. Структурная схема нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора

Эталонная модель определяет желаемый выход для данного входа. Ошибка модели вычисляются с использованием выходного сигнала эталонной модели и вывод объекта, а затем ошибка модели используется для обновления весов нейронных сетей. Для обновления весовых коэффициентов алгоритм обратного распространения был модифицирован с учетом вышеуказанного критерия и использована форма алгоритма ПИД-регулятора в дискретном времени:

$$u(n) = u(n-1) + K_p(e(n) - e(n-1)) + K_i e(n) + K_d(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)) \quad (8)$$

где K_p , K_i и K_d - пропорциональные, интегральные и дифференциальные коэффициенты усиления, соответственно, $u(n)$ обозначает ввод установки при n , а e - ошибка управления. Здесь n - интервал выборки. Чтобы настроить K_p , K_i и K_d была использована

трехслойная нейронная сеть с сигмоидальными функциями активации в скрытом слое и функциями линейной активации в выходном слое. Каждый слой состоит из нейронов i , j и k , где i и j можно выбрать методом проб и ошибок. $k=3$, соответствует количеству коэффициентов усиления ПИД. Функция, которая должна быть минимизирована методом обратного распространения, определяется как квадратичная ошибка модели (7). Веса на выходном и скрытом слоях обновляются с использованием следующих уравнений.

$$\Delta w_{kj}(n+1) = \eta \delta_k o_j + \alpha \Delta w_{kj}(n) + \beta \Delta w_{kj}(n-1) \quad (9)$$

$$\Delta w_{ji}(n+1) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ji}(n) + \beta \Delta w_{ji}(n-1) \quad (10)$$

где $k=1,2,3$; $j= 1,2, \dots N2$; $i=1,2, \dots N1$, η -скорость обучения, α и β - импульсы, а w_{ji} обозначает вес соединения от входного узла i до нейрона j , w_{kj} обозначает вес соединения от нейрона j , чтобы вывести нейрон k . Локальный градиент $\delta_j(n)$ для скрытого нейрона j определяется как:

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial o_j(n)} \frac{\partial o_j(n)}{\partial net_j(n)} \quad (11)$$

$$\delta_j(n) = \frac{\partial E(n)}{\partial o_j(n)} f'_j(net_j(n)) \quad (12)$$

Следовательно

$$\delta_j(n) = f'_j(net_j) \sum_{k=1}^3 e_k(n) f'(net_k) w_{kj} \quad (13)$$

Локальный градиент выходных нейронов δ_k определяется как:

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k} \quad (14)$$

Из уравнения (7) ошибка модели определяется как:

$$E = \frac{1}{2} e_k(n+1)^2 = \frac{1}{2} (y_m(n+1) - y(n+1))^2 \quad (15)$$

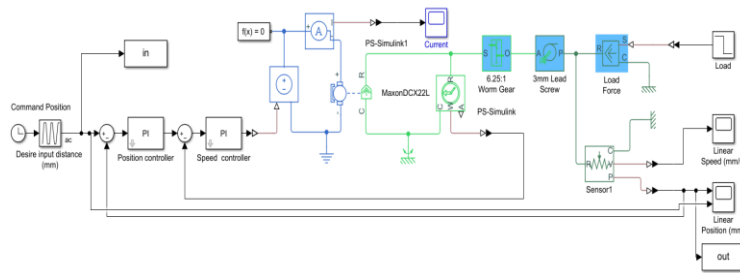


Рис. 5. Модель двигателя постоянного тока (MaxonDCX22L) с использованием ПИ-регулятора

Эталонная модель для получения входных и целевых образцов показана на рис 5. Входные и выходные данные из эталонной модели перемещаются в рабочее пространство Matlab, который используется для обучения сети. Пропорциональные и интегральные коэффициенты для регулятора положения инициализируются до $K_p=1425,3$ и $K_i=30,8$ в эталонной модели соответственно. Результат моделирования линейного положения вала двигателя постоянного тока (MaxonDCX22L) с ПИ регулятором показан на рис. 6. Метод командной строки используется для обучения нейронной сети, которая предоставляет параметры ПИ-регулятора из значений смещения сети.

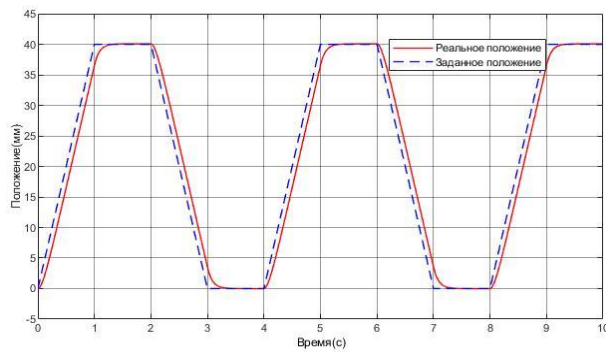


Рис 6. Результат моделирования линейного положения вала двигателя постоянного тока (MaxonDCX22L) с ПИ-регулятором

Затем анализируются результаты моделирования по различному времени с помощью системы измерения в среде Simulink.

В таблице 1 приведены сравнительные результаты моделирования линейного положения вала двигателя постоянного тока по различному времени с ПИ-регулятором и нейро-сетевым настройщиком ПИ-регулятора.

Табл 1. Сравнительные результаты моделирования линейного положения вала двигателя постоянного тока

	МахонDCX22L (Пи-регулятор) Регулятор положения- kp=1425,3 , ki=30,8 Регулятор скорости - kp=13,8, ki=20,6	МахонDCX22L (Нейро-сетевой настройщик Пи- регулятора) Регулятор положения- kp=5241,2, ki=0.1 Регулятор скорости - kp=13,8, ki=20,6
Время(с)	Положение(мм)	Положение(мм)
1,2		40,00
1,4	40,06	40,00
1,5	40,03	40,00
1,6	40,07	40,00
1,7	40,07	40,00
5,4	40,07	40,00
5,5	40,06	40,00
5,6	40,06	40,00
5,7	40,07	40,00
	±0,07мм (погрешность)	±0 мм (погрешность)
	Время нарастания – 0,3с	Время нарастания – 0,1с

В главе проведено исследование метода управления асинхронным двигателем с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора и предложена структурная схема управления асинхронным двигателем с использованием нейро-сетевого настройщика.

Для разработки используется адаптивное управление с эталонной моделью и нейро-сетевой настройщик ПИ регулятора. Структурная схема управление асинхронным двигателем с помощью нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора показана на рис.9.

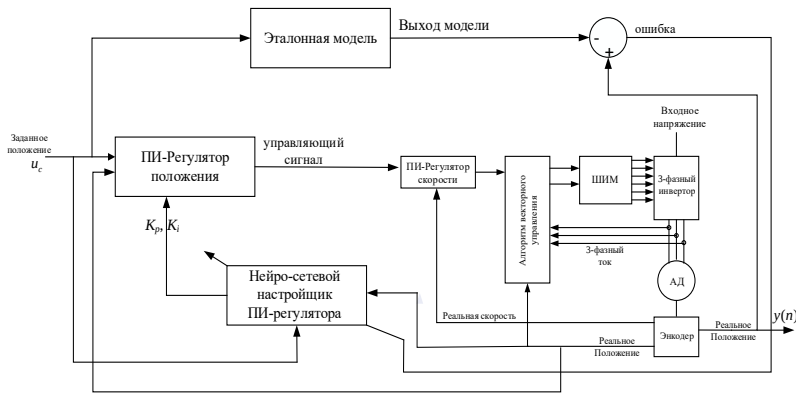


Рис 9. Структурная схема управление асинхронным двигателем с помощью нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора

Была использована форма алгоритма ПИ-регулятора в дискретном времени:

$$u(n) = u(n-1) + K_p(e(n) - e(n-1)) + K_i e(n) \quad (16)$$

где K_p и K_i – пропорциональные и интегральные коэффициенты усиления, соответственно, $u(n)$ обозначает ввод установки при n , а e – ошибка управления. Чтобы настроить K_p и K_i была использована трехслойная нейронная сеть с сигмоидальными функциями активации в скрытом слое и функциями линейной активации в выходном слое. Функция командной строки показана в приложении (3). Структура нейронной сети состоит из 6 нейронов с передаточной функцией (tansig) в входном слое, 24 нейронов с передаточной функцией (tansig) в скрытом слое, 2 нейроны с передаточной функцией (purelin) в выходном слое. Функция, которая должна быть минимизирована методом обратного распространения, определяется как квадратичная ошибка модели (7).

На рис.10 представлен алгоритм нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора для управления асинхронным двигателем.

Пропорциональные и интегральные коэффициенты инициализируются до $K_p=25$ и $K_i=1$ для регулятора положения в эталонной модели соответственно. После успешного обучения, пропорциональные и интегральные значения 74,5 и 6,5.

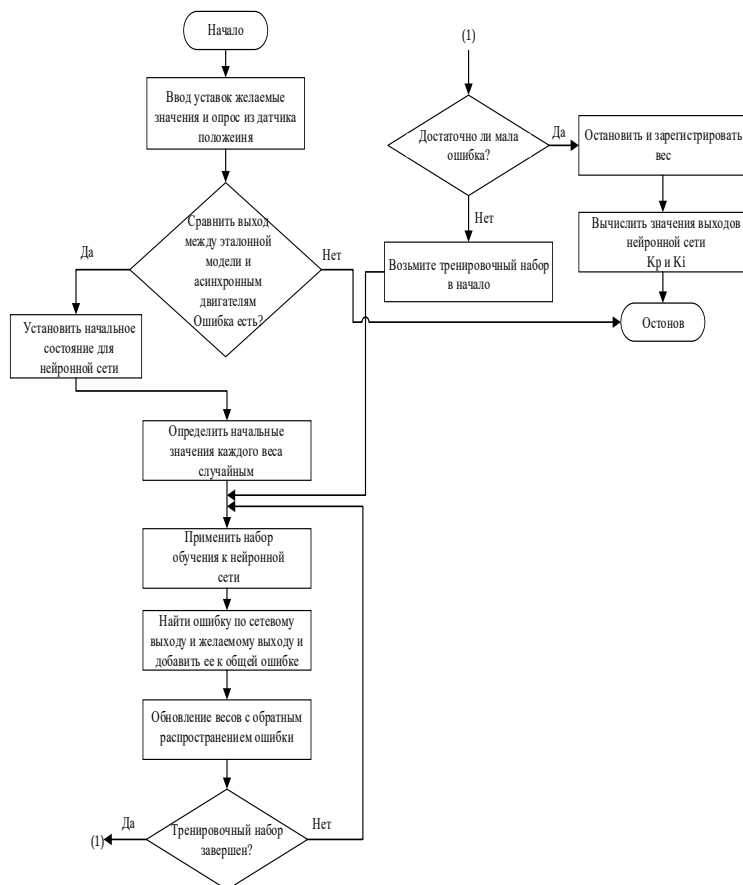


Рис. 10 Алгоритм нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора для управления асинхронным двигателем

Математическая модель управления положением вала асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора показана на рис. 11. Результат моделирования управления положением вала асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора показан на рис.12.

нейро-сетевого настройщика ПИ-регулятора составляет $\pm 0,1$ мм соответственно.

Табл 2. Сравнительные результаты моделирования асинхронного двигателя

	Мощность = 3кВт Момент нагрузки = 30 Н.м (сама настройщик) Регулятор положения- $k_p=25$, $k_i=1$ Регулятор скорости - $k_p=32$, $k_i=7.5$	Мощность = 3кВт Момент нагрузки = 30 Н.м (нейро-сетевой настройщик) Регулятор положения- $k_p=74,5$, $k_i=6,5$ Регулятор скорости - $k_p=32$, $k_i=7.5$
Время(с)	Положение(мм)	Положение(мм)
1,2	372,3	372,2
1,4	372,4	372,2
1,6	372,4	372,2
1,8	372,4	372,2
5,2	372,2	372,2
5,4	372,3	372,2
5,6	372,3	372,2
5,8	372,3	372,2
9,2	372,2	372,1
9,4	372,4	372,1
9,6	372,4	372,1
9,8	372,4	372,1
	$\pm 0,3$ мм (Погрешность)	$\pm 0,1$ мм (Погрешность)
	Время нарастания – 0,2с	Время нарастания – 0,08с

Основные результаты работы.

В заключении подводятся итоги проведенной работы. В соответствии с целями и задачами представленной диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Предложены математические модели, алгоритмы управления и структурные схемы систем управления двигателями постоянного и переменного тока с обратной связью по скорости и по положению.
2. Предложен метод высокоточного управления частотно-регулируемыми сервоприводами при различных нагрузках и режимах работы.

3. Реализован канал управления режимами работы микропроцессорной системы приводов с использованием протокола CAN.
4. Предложен метод настройки, разработана модель нейро-сетевого настройщика ПИД регулятора сервопривода с использованием адаптивного управления с эталонной моделью в системе управления, снижающий время настройки и повышающий эффективность и надежность системы.
5. Разработана система управления двигателем постоянного тока с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора для высокоточных систем позиционирования, обеспечивающая по сравнению с классическим регулятором уменьшение перерегулирования до 5% и уменьшение времени установления до 0,2 сек.
6. Разработана система управления положением вала асинхронного двигателя с использованием нейро-сетевого настройщика ПИ регулятора для высокоточных систем позиционирования, обеспечивающая по сравнению с классическим ПИ регулятором снижение перерегулирования до 10% и уменьшение времени установления до 1,2 сек.
7. Разработаны структурная и функциональная схемы микропроцессорной системы с частотно-регулируемыми сервоприводами на программируемых пользователями вентильных матрицах (ППВМ).

Список опубликованных по теме диссертации работ.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Йе Наунг**, Щагин А.В, Зо Мин Кхаинг. Режимы управления двигателям постоянного тока с замкнутым контуром в высокоточных системах позиционирования // «Известия вузов. Электроника» Т.23, № 3, июнь-июль 2018 С. 304-308
2. **Йе Наунг**, Щагин А.В, Зо Мин Кхаинг. Реализация системы управления сервоприводами с использованием протокола CAN в промышленности // «Электронные и информационные системы» Номер: 1 (16), 2018, С. 5-10
3. **Йе Наунг**, Щагин А.В, Зо Мин Кхаинг. Модель нейрорегулятора для управления синхронным двигателем с постоянными магнитами // «Электронные и информационные системы» Номер: 4 (19), 2018, С. 59-66

Публикации, включенные в библиографическую базу Scopus:

4. **Ye Naung**, Schagin Anatolii, Htin Lin Oo, Zaw Min Khaing. The Comparative Analysis of Modelling of Simscape Physical Plant System Design and Armature-Controlled System Design of DC Motor // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. 978-1-5090-4865-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE C. 998-1002
5. **Ye Naung**, Htin Lin Oo, Schagin Anatolii, Kyaw Zaw Ye, Zaw Min Khaing. Modelling and control of an open-loop stepper motor in Matlab/Simulink // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. 978-1-5090-4865-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE C. 869-872
6. **Ye Naung**, Htin Lin Oo, Schagin Anatolii, Zaw Min Khaing. Special features of neuro controller in the automatic control systems // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2017 IEEE Conference of Russian. 978-1-5090-4865-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE C. 1091-1093
7. **Ye Naung**, Htin Lin Oo, Schagin Anatolii, Kyaw Zaw Ye, Zaw Min Khaing. Implementation of data driven control system of DC motor by using system identification process // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian. C. 1801-1804
8. **Ye Naung**, Schagin Anatolii, Phyo Hylam Htut, Zaw Min Khaing. Development of control system for fruit classification based on convolutional neural network // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian. C. 1805-1807
9. **Ye Naung**, Schagin Anatolii, Ye Htet Lin. Speed control of DC motor by using neural network parameter tuner for PI-controller Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2019 EIConRus), 2019 IEEE Conference of Russian. C. 2152-2156

Результаты интеллектуальной деятельности:

10. **Йе Наунг**, Пьо Хьлам Хтут, Зо Мин Кхайнг, Хтин Линн У. Программа для физического моделирования интегрированной системы учета и контроля энергоносителей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № - 2017611015, 19.01.2017
11. **Йе Наунг**, Хтин Линн У, Е Тет Линн. Программный модуль управления положением и скоростью двигателя постоянного тока с использованием ПИД регулятора // Свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ № - 2019666318, 09.12.2019

Другие статьи и материалы конференций:

12. **Йе Наунг**, Щагин А.В. Особенности использования двигателей постоянного и переменного тока в металлообрабатывающих станках // «Электронные и информационные системы» Номер: 1 (20), 2019, С. 33-43
13. **Йе Наунг**. Методы измерения перемещений с использованием датчиков энкодерного типа // 22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2015». -М.: МИЭТ, 22 – 24 апреля 2015 года. С. 222
14. **Йе Наунг**. Режимы регулирования сервоприводов на высокоточных системах позиционирования // Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 19-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука» с 1 октября по 10 декабря 2015 года. С. 66-66а
15. Щагин А.В, **Йе Наунг**. Система слежения на серводвигателях с использованием датчиков ориентации// 23-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2016»-М.: МИЭТ, 20 – 22 апреля 2016 года. С.198
16. **Йе Наунг**, Зо Мъ Наин. Реализация точности квадратурного инкрементального энкодера в электроприводах // 24-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2017». М.: МИЭТ, 19 – 20 апреля 2017 года. С. 190
17. **Йе Наунг**, Е Тет Линн. Реализация ПИ регулятора на основе нейронной сети // 25-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2018». -М.: МИЭТ, 18 – 19 апреля 2018 года С. 127

Подписано в печать:

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. л.1,2

Тираж 80 экз. Заказ № 36

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ.