

Черный С. П., Емельянов К. А., Лямин М. А., Облогин Д. Ю.
S. P. Cherniy, K. A. Emelianov, M. A. Lyamin, D. Yu. Oblogin

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

**SIMULATION OF A MULTI-STAGE FUZZY CONTROLLER FOR CONTROLLING
A MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM**

Черный Сергей Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keapu@knastu.ru.

Sergei P. Cherniy – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keapu@knastu.ru.

Емельянов Кирилл Андреевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Kirill A. Emelianov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Лямин Михаил Андреевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: lyamin.ma@email.knastu.ru.

Mikhail A. Lyamin – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: lyamin.ma@email.knastu.ru.

Облогин Данил Юрьевич – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Danil Yu. Oblogin – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе рассмотрена возможность построения интеллектуальной системы управления многодвигательной системой электроприводов, основанной на теории нечётких множеств. С учётом дополнительного критерия регулирования, накладываемого на систему управления, показана необходимость её построения на основе многокаскадной методологии, которая включает в себя принципы иерархичности и модульности. В материалах статьи предложена модель многокаскадного нечёткого логического регулятора содержащего нечёткий модуль во внешнем каскаде и три простейших нечётких элемента во вложенном. Анализ многокаскадной нечёткой системы управления многодвигательным объектом проведён с учётом различных воздействий недетерминированного характера в каналах регулирования и возмущения.

Summary. In this paper, the possibility of constructing an intelligent control system for a multi-motor electric drive system based on the theory of fuzzy sets is considered. Taking into account the additional criterion of regulation imposed on the management system, the necessity of its construction based on a multi-stage methodology, which includes the principles of hierarchy and modularity, is shown. The materials of the article propose a model of a multi-stage fuzzy logic controller containing a fuzzy module in an external cascade and three simplest fuzzy elements in a nested one. The analysis of a multi-stage fuzzy control system for a multi-motor object was carried out taking into account various non-deterministic effects in the control channels and disturbances.

Ключевые слова: многодвигательная система, система управления электроприводом, многокаскадный нечёткий логический регулятор.

Key words: multi-motor system, electric drive control system, multi-stage fuzzy logic controller.

Исследования проводились в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники» и при поддержке гранта Умник № 19419ГУ/2024 от 30.05.2024 «Разработка робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов».

УДК 681.5.01:658.5

Введение. В связи с тем, что требования к процессам управления в различных высокотехнологичных отраслях, таких как робототехника, авиастроение и электроэнергетика, постоянно растут, разработка новых систем управления, качественно улучшающих существующие процессы, приобретает критическое значение. Для обеспечения высоких показателей качества управления необходимы точная математическая модель объекта управления и чётко сформулированная система ограничений работы этого объекта. С учётом изменяющихся подходов к формализации объектов регулирования, а именно к повышению требований к точности, качеству математического описания, сокращению ограничивающих факторов, наличию целого ряда критериев оптимизации, необходимо изменить подходы к синтезу нечётких систем. Возможными вариантами реализации такого рода требований к системе могут являться как структурные изменения (внедрение вложенности в регуляторы), так и параметрические модификации (моделирование функций принадлежности пространственной формы) [1–4]. Примером структурных изменений является синтез регуляторов, структурно разделяемых на несколько уровней или каскадов. Внедрение многокаскадности в нечёткий логический регулятор позволит существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его возможности адаптации к изменениям условий работы системы (как внешним, в виде разнородных возмущающих воздействий, так и внутренних при изменении свойств объекта управления), облегчить процессы настройки и перенастройки, а также уменьшить информационную избыточность и алгоритмическую сложность регуляторов при реализации в виде единого модуля.

На основе вышеописанного использование многокаскадных нечётких регуляторов для управления сложными технологическими объектами (к примеру, многодвигательными аппаратами) позволит реализовать процедуры управления с учётом различных дополнительных критериев.

Моделирование интеллектуальной системы. В качестве объекта регулирования выступает многодвигательная система, в состав которой входят два электропривода постоянного тока, примерно сопоставимые по развиваемым моменту и скорости вращения вала [6–9]. При этом один из приводов является основным, а второй подключается в систему для компенсации возникающих возмущающих воздействий. Валы двигателей объединены в единую систему через редукторы. Однако в данной конкретной работе предметом исследования является формирование интеллектуальной системой общего момента электродвигателей с учётом возникающих ситуаций, поэтому подробное описание механических взаимосвязей электродвигателей рассматриваться не будет (см. рис. 1).

В представленной интеллектуальной системе управления, основанной на многокаскадном нечётком логическом регуляторе, заложены следующие функции:

1. регулирование основного электропривода в зависимости от заданного сигнала, поступающего на основной регулятор;
2. подключение вспомогательного электропривода в моменты возникновения просадок скорости вращения вала основного привода;
3. контроль выходной величины вспомогательного электропривода с целью компенсации возникшей просадки и поддержания выходного сигнала всей системы на необходимом уровне [10–12].

При реализации необходимых процедур регулирования в многодвигательной системе для принятия решений интеллектуальной системе необходим следующий набор входных данных:

- ошибка системы по скорости вращения основного электропривода;

- интеграл от сигнала ошибки основного электропривода;
- преобразованный сигнал ошибки основного электропривода.

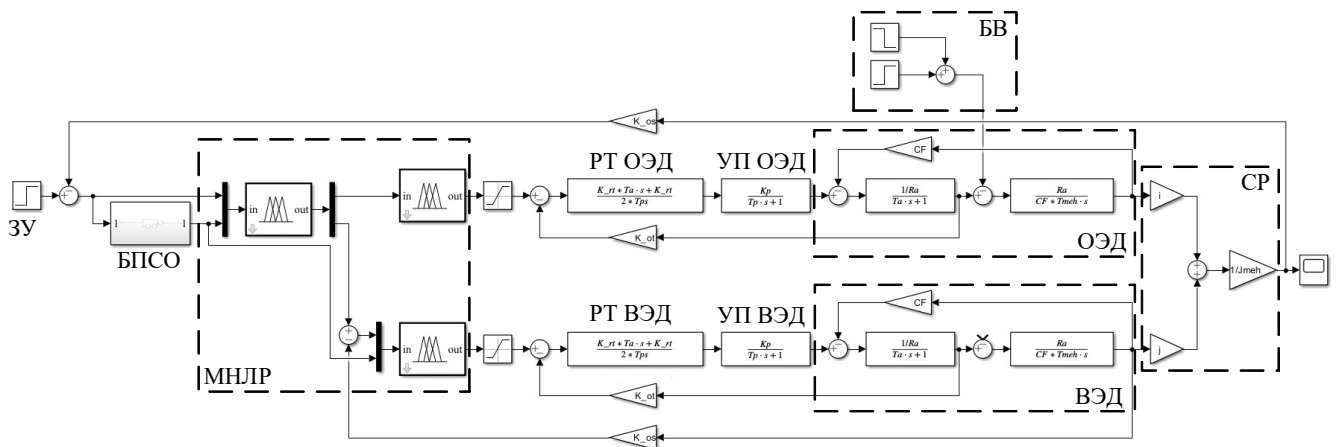


Рис. 1. Имитационная модель интеллектуальной системы управления многодвигательным объектом: ЗУ – задающее устройство; БПСО – блок преобразования сигнала ошибки; МНЛР – многокаскадный нечёткий логический регулятор; РТ ОЭД – регулятор тока основного электродвигателя; РТ ВЭД – регулятор тока вспомогательного электродвигателя; УП ОЭД – управляемый преобразователь основного электродвигателя; УП ВЭД – управляемый преобразователь вспомогательного электродвигателя; ОЭД – основной электродвигатель; ВЭД – вспомогательный электродвигатель; БВ – блок возмущений; СР – система редукторов

Преобразование сигнала основного электропривода, формализующего ошибку по скорости, проводится для определения уровня просадки скорости вращения вала. Структурная схема блока, который реализует преобразование сигнала ошибки, приведена на рис. 2.

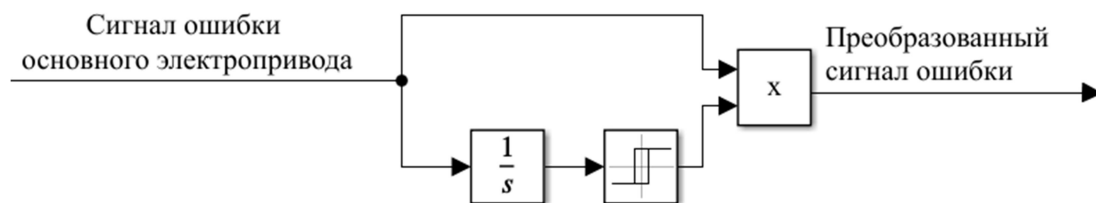


Рис. 2. Структурная схема блока преобразования сигнала ошибки

Преобразованный сигнал ошибки представляет собой разницу между номинальным значением скорости вращения вала и установившимся значением скорости после возникновения возмущающего воздействия.

С учётом вышеперечисленных требований формируется структура многокаскадного нечёткого логического регулятора, показанного на рис. 3. Нечёткий регулятор внешнего каскада Main-Fuzz, который в системе является управляющим и анализирующим устройством, содержит две лингвистических переменных входного канала и две лингвистических переменных выходного канала регулятора [13; 14].

Представленный на рис. 3 многокаскадный нечёткий логический регулятор функционирует на основе алгоритма нечёткого вывода Мамдани. Целевыми задачами его функционирования являются интеллектуальная оценка входных сигналов и выбор управляющего воздействия на вложенный каскад регуляторов многокаскадной нечёткой системы управления в соответствии с текущим состоянием системы [15; 16].

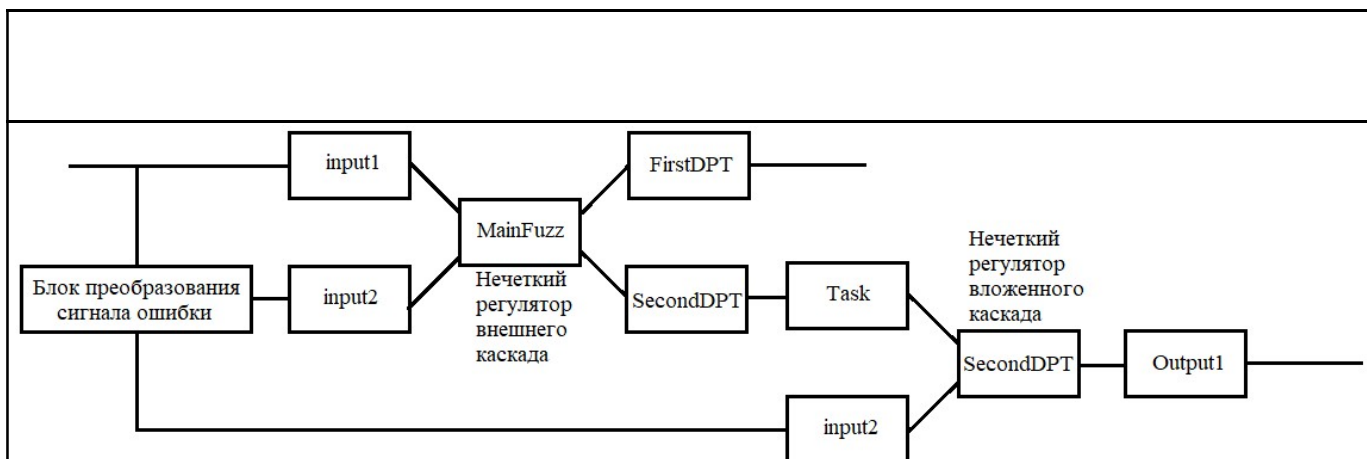


Рис. 3. Функциональная схема многокаскадного нечёткого логического регулятора

Структурный синтез многокаскадного нечёткого регулятора. За формализацию понятия входного сигнала нечёткого логического регулятора отвечают лингвистические переменные *input1* и *input2*. Терм-множество лингвистической переменной *input1* представлено набором из пяти нечётких переменных с треугольными функциями принадлежности. Лингвистическая переменная *input2* формализуется аналогичным набором параметров, но в своей заданной области определения.

Формирование процедур управления основным электроприводом обеспечивает лингвистическая переменная *FirstDpt*, формализующая понятия выходного сигнала управления по скорости пятью термами в базовом терм-мноестве и функциями принадлежности треугольного вида. Второй выход нечёткого регулятора внешнего каскада описывает лингвистическая переменная *SecondDpt*, которая формализует понятие управления включением вспомогательного электропривода с аналогичным набором нечётких переменных.

Нечёткая продукционная база знаний НЛР формируется с применением общепринятых методик и будет состоять из шести продукционных правил.

Необходимо отметить, что в списке правил обязательно наличие специализированного правила, определяющего условие, при котором осуществляется подключение вспомогательного электропривода.

Для корректной работы многокаскадного регулятора в продукционную базу правил необходимо внести правила, формализующие функционал корректировки в структуре элементов, связанных со вспомогательным электроприводом, реализация процедуры управления которым возлагается на нечёткий модуль вложенного каскада. Основным функциональным назначением нечёткого логического регулятора *SecondDPT* (см. рис. 3) является формирование сигнала управления в канале регулирования скорости вспомогательного электропривода. Вход нечёткого логического регулятора представлен лингвистической переменной *Task*, которая формализует понятие первого входного сигнала стандартным терм-множеством из пяти нечётких переменных с аппроксимированными функциями принадлежности.

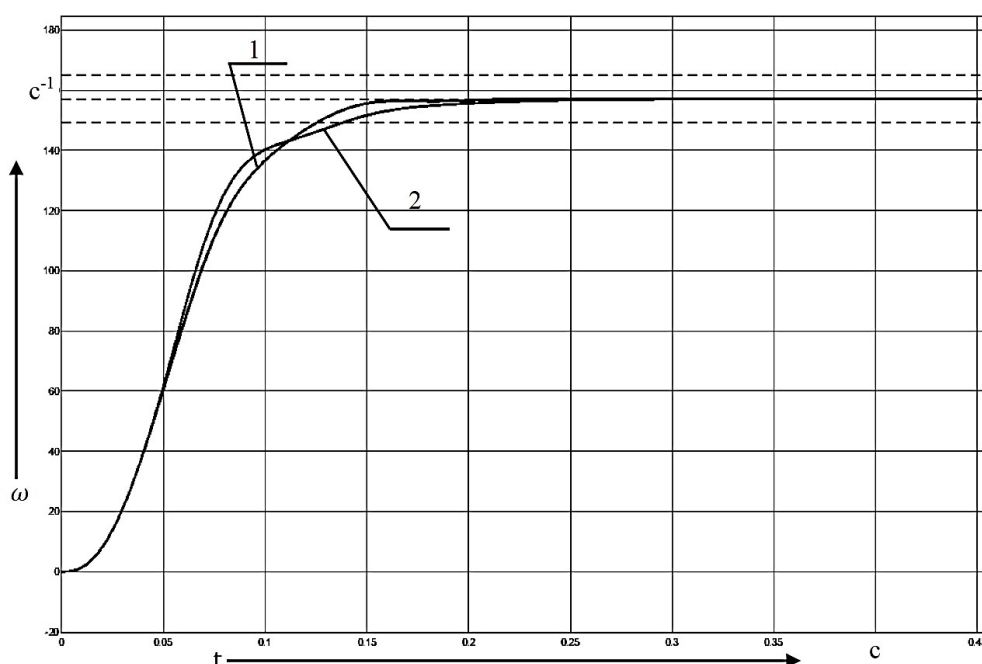
Результатом дефаззификации лингвистической переменной *Output1* на диапазоне регулирования пятью термами и набором равномерно распределённых функций принадлежности аппроксимированного вида является формирование сложного управляющего сигнала для вспомогательного электропривода многодвигательной системы.

База знаний нечёткого регулятора *SecondDPT*, формирующего вложенный каскад интеллектуальной системы управления многодвигательным электроприводом, будет иметь следующий набор:

1. Если «*Task*» есть *mf1* и «*input2*» есть *mf1*, то «*Output1*» есть *mf1*;
2. Если «*Task*» есть *mf2* и «*input2*» есть *mf2*, то «*Output1*» есть *mf2*;
3. Если «*Task*» есть *mf3* и «*input2*» есть *mf3*, то «*Output1*» есть *mf3*;
4. Если «*Task*» есть *mf4* и «*input2*» есть *mf4*, то «*Output1*» есть *mf4*;
5. Если «*Task*» есть *mf5* и «*input2*» есть *mf5*, то «*Output1*» есть *mf5*.

Одной из целей при построении многокаскадной системы управления также является улучшение показателей регулирования классической системы, таких как уменьшение времени регулирования и снижение величины перерегулирования.

Далее на рис. 4 представлены графики переходных характеристик многодвигательной системы, которая регулируется многокаскадным нечётким регулятором. Также для проведения сравнительного анализа на рис. 4 и 5 приведены графики переходных процессов аналогичной многодвигательной системы, но с классическим регулятором скорости, настроенным на модульный оптимум.



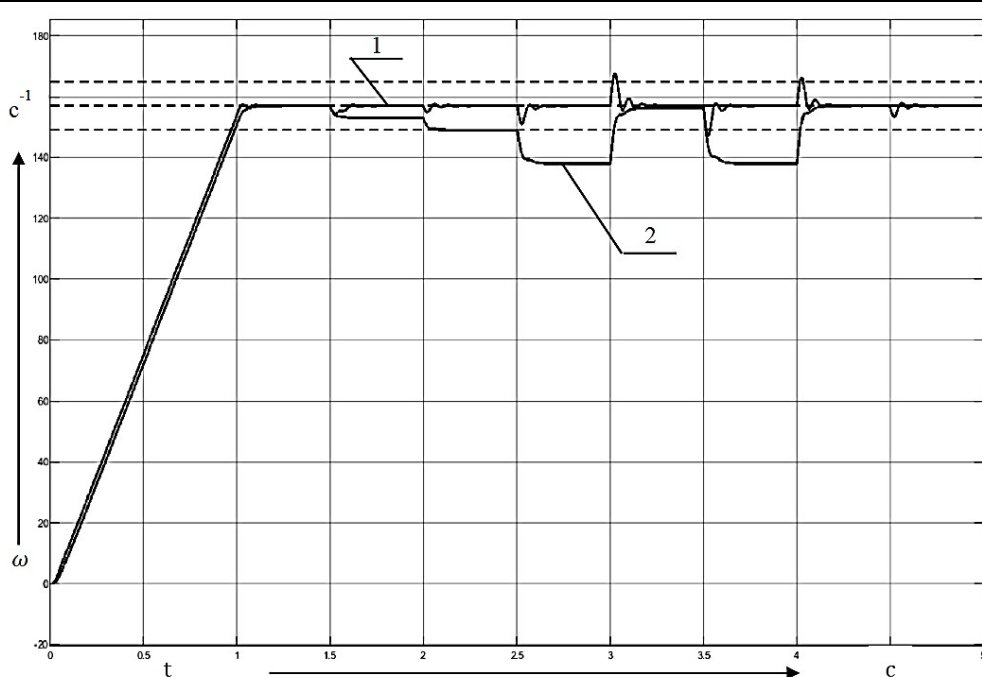
1 – система с нечётким многокаскадным регулятором; 2 – система с классическим регулятором
Рис. 4. Переходная характеристика по скорости в многодвигательной системе

На рис. 4 можно видеть улучшение основных показателей качества регулирования, например повышение быстродействия системы при использовании многокаскадного нечёткого логического регулятора в качестве управляющего устройства.

Проведём анализ системы при подаче на неё комплексного возмущающего воздействия, состоящего из ряда последовательных сигналов дискретного характера (см. рис. 5).

Характеристики, представленные на рис. 5, иллюстрируют отсутствие способности классической системы к стабилизации скорости и поддержанию её необходимой величины при подаче на многодвигательный электропривод комплексного возмущающего воздействия. В свою очередь, разработанная многодвигательная система способна обеспечить компенсацию ряда импульсных внешних негативных воздействий и поддерживать выходной сигнал системы на заданном уровне.

Заключение. Была разработана интеллектуальная система управления многодвигательным электроприводом, способная поддерживать необходимый выходной сигнал, не превышая номинальных параметров её элементов. Предложенная многокаскадная система управления элементами многодвигательного электропривода позволяет не только синхронизировать работу основного и вспомогательного электропривода, но и реализовывать процедуры управления двигателями независимо за счёт вложенности нечётких модулей, а также осуществлять компенсацию различных недетерминированных внешних возмущений.



1 – система с нечётким многокаскадным регулятором; 2 – система с классическим регулятором
 Рис. 5. Переходная характеристика многодвигательной системы при наличии комплексного возмущающего воздействия

В развитии методологии нечёткого многокаскадного управления представлен структурный синтез интеллектуального регулятора, который реализует комплексную процедуру регулирования во внешнем каскаде. Такая процедура управления совмещает в себе реализацию закона управления для основного электропривода многодвигательной системы с подключением вложенного каскада. На единственный нечёткий модуль вложенного каскада в структуре развитой интеллектуальной системы управления возложена функция формирования управляющего воздействия на дополнительный двигатель в составе объекта регулирования. Кроме того, необходимо отметить, что регулирование основным электроприводом в многодвигательной системе может быть реализовано также и посредством включения во вложенный каскад соответствующего нечёткого модуля. В перспективе предложенного структурного решения можно отметить, что в качестве вложенных модулей могут выступать и регуляторы, настроенные с использованием традиционных классических принципов, а также смешанное гетерогенное представление схемы такой интеллектуальной системы управления.

Предложенная методика многокаскадного нечёткого управления позволит реализовывать сложные процедуры регулирования для целого ряда робототехнических транспортных комплексов, имеющих в своей основе набор электроприводов различных габаритов в условиях действия совокупности критериев, таких как точность позиционирования, повышение энергоэффективности, оптимизация перемещения по траекториям сложной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный, С. П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для стабилизации модульного тралового механизма / С. П. Черный, В. Н. Хрульков, Б. Я. Мокрицкий // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 11. – С. 126-132.
2. Черный, С. П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для управления многосоставным траловым механизмом на основе оператора сложения / С. П. Черный, В. Н. Хрульков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 53-60.

3. Лямин, М. А. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 66-73.
4. Лямин, М. А. Система согласованного управления положением взаимосвязанных электроприводов роботизированной транспортной платформы / М. А. Лямин, С. П. Черный // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4 (1). – С. 331-340.
5. Стельмашук, С. В. Система подчинённого управления скалярным частотно-регулируемым многодвигательным электроприводом с независимым соединением асинхронных двигателей / С. В. Стельмашук, И. Ю. Лакеев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 57-65.
6. Стельмашук, С. В. Подчинённое управление многодвигательным электроприводом с последовательным соединением двигателей постоянного тока с независимым возбуждением / С. В. Стельмашук, А. А. Гурулев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 403-411.
7. Стельмашук, С. В. Разработка системы управления электропривода насоса для гидравлической сети с учётом инерционной составляющей давления / С. В. Стельмашук, С. Д. Демин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III (59). – С. 78-84.
8. Дубовик, М. Е. Исследование электропривода переменного тока с управлением по цепи ротора / М. Е. Дубовик, В. А. Соловьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 390-399.
9. Лисин, С. Л. Повышение быстродействия следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем / С. Л. Лисин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2012. – № 4 (36). – С. 173-181.
10. Стариков, А. В. Следящий электропривод с асинхронным исполнительным двигателем / А. В. Стариков, Д. Н. Джабасова // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». – 2014. – № 5. – С. 72-75.
11. Михайлов, О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О. П. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
12. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академик», 2005. – 304 с.
13. Максимова, Н. А. Применение технологии многокаскадного нечёткого управления для электроприводов постоянного тока / Н. А. Максимова, С. П. Черный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 4 (25). – С. 50-54.
14. Черный, С. П. Моделирование интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечётким ПИД-регулятором / С. П. Черный, Е. Н. Землянская, А. С. Филатова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – Т. IV-1 (24). – С. 15-21.
15. Khrulkov, V. Method of Implementing a Fuzzy Logic Controller by Hardware / V. Khrulkov, S. Vasilchenko, S. Cherny // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06-09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271539. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271539.
16. Cherniy, S. P. Modeling of an Advanced Fuzzy Logic Controller with Elementary Links in the Internal Cascade / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikayeva // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06-09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271136. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271136.