

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 62-523

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117

## НЕЧЕТКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНО- ТРАНСПОРТНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

Синюков А.В.<sup>1</sup>, Синюкова Т.В.<sup>1</sup>, Абдуллазянов Э.Ю.<sup>2</sup>, Грачева Е.И.<sup>2</sup>,  
Мещеряков В.Н.<sup>1</sup>, Valtchev S.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>3</sup>New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

ORCID\*: zeitsn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru),  
[mesherek@yandex.ru](mailto:mesherek@yandex.ru), [svaltchev@outlook.com](mailto:svaltchev@outlook.com)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Исследование посвящено проблемам обеспечения плавности пуска и останова подъемно-транспортных механизмов. Стандартные регуляторы не позволяют добиться желаемых результатов при изменяющихся показателях, точные значения которых не всегда доступны для измерения. Управляющие сигналы, в таких системах, обычно соответствуют данным из некоторого диапазона. В работе предлагается замена стандартного регулятора на регулятор, работа которого базируется на нечетких алгоритмах. Процесс моделирования системы с разными типами регуляторов, позволяет исследовать системы и выявить наиболее оптимальные из них. МЕТОДЫ. Для решения поставленной проблемы использовались методы математического моделирования в среде MatLab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрена возможность использования регуляторов разного рода на подъемно-транспортных механизмах. Для функционирования регулятора нечеткого типа разработана база правил, формирующая процесс работы реального объекта, с оптимальным алгоритмом функционирования. Реализованы системы с регулятором ПИД типа, с регулятором нейросетевого типа с обеспечением обучения сети, с возможностью ее подстройки для дальнейшего применения, выполнен учет вероятности высокой загрузки процессора, на основании чего предложен супервизор. Рассмотрена возможность применения ANFIS-сетей для реализации регуляторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование разных типов регуляторов, работающих по принципу нейросетевых технологий, позволяет достичь оптимальных показателей при управлении подъемно-поворотными механизмами, как с позиций обеспечения устойчивости движения, так и с позиций надежности систем. По сравнению с регулятором ПИД типа, применение сети ANFIS снизило колебания в 2,9 раза, а использование регулятора нечеткого типа уменьшило колебания в 0,75 раза. Применение нейронного регулятора по сравнению с использованием сети ANFIS, дает снижение колебательности процесса формирования скорости примерно в 0,48 раза.

**Ключевые слова:** нечеткая логика; интеллектуальные устройства; система управления; электропривод; механизмы перемещения грузов.

**Для цитирования:** Синюков А.В., Синюкова Т.В., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Мещеряков В.Н., Valtchev S. Нечеткие технологии в системах управления подъемно-транспортными механизмами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 105-117. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117.

## FUZZY TECHNOLOGIES IN CONTROL SYSTEMS OF LIFTING AND TRANSPORT MECHANISMS

AV. Sinyukov<sup>1</sup>, TV. Sinyukova<sup>1</sup>, EYu. Abdullazyanov<sup>2</sup>, EI. Gracheva<sup>2</sup>,  
VN. Meshcheryakov<sup>1</sup>, S. Valtchev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>3</sup> New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, [zeitsn@yandex.ru](mailto:zeitsn@yandex.ru), [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru),  
[svaltchev@outlook.com](mailto:svaltchev@outlook.com)

**Abstract:** *THE PURPOSE.* The study is devoted to the problems of ensuring the smooth start and stop of lifting and transport mechanisms. Standard regulators do not allow you to achieve the desired results with changing indicators, the exact values of which are not always available for measurement. Control signals, in such systems, usually correspond to data from a certain range. The paper proposes to replace the standard controller with a controller based on fuzzy algorithms. The process of modeling a system with different types of controllers allows you to explore systems and identify the most optimal of. *METHODS.* To solve the problem, the methods of mathematical modeling in the MatLab Simulink environment were used. *RESULTS.* The article considers the possibility of using various kinds of regulators on lifting and transport mechanisms. For the functioning of the fuzzy type controller, a rule base has been developed that forms the process of operation of a real object, with an optimal functioning algorithm. Systems with a PID-type controller, with a neural network-type controller with network training, with the possibility of its adjustment for further use, are implemented, the probability of high processor load is taken into account, on the basis of which a supervisor is proposed. The possibility of using ANFIS networks for the implementation of regulators is considered. *CONCLUSION.* The use of different types of controllers operating on the principle of neural network technologies makes it possible to achieve optimal performance in the control of lifting and turning mechanisms, both from the standpoint of ensuring the stability of movement, and from the standpoint of system reliability. Compared with the PID type controller, the application of the ANFIS network reduced the fluctuation by 2.9 times, and the use of the fuzzy type controller reduced the fluctuation by 0,75 times. The use of a neural controller compared to the use of the ANFIS network gives a decrease in the fluctuation of the speed formation process by about 0.48 times.

**Keywords:** fuzzy logic; intelligent devices; control system; electric drive; mechanisms for moving goods.

**For citation:** Sinyukov AV, Sinyukova TV, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Meshcheryakov VN, Valtchev S. Fuzzy technologies in control systems of lifting and transport mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (1): 105-117. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117.

### **Введение (Introduction)**

Интеллектуальные системы управления с каждым годом занимают более прочные позиции на промышленных объектах, становясь неотъемлемой частью производственного процесса, позволяющей улучшить протекание переходных процессов и скорость реакции, на управляющий сигнал, входя в состав автоматических систем управления. Регулирование динамических процессов, в системах данного типа происходит за счет использования нейросетевых алгоритмов и алгоритмов, на базе нечеткой логики [1, 2].

Системы с автоматическим типом управления нашли широкое применение на устройствах, где участие человека в процессе сведено к минимуму в связи с необходимостью обработки большого количества информационного потока или в случае, когда к системе предъявляются высокие требования по качеству точности регулирования протекающих процессов, а так же если функционирование объекта осуществляется при изменяющихся внешних и внутренних условиях, не поддающихся точной оценке [3, 4].

Основной целью систем такого типа является воздействие на показатели изменяющихся во времени величин, что достигается путем подбора необходимой методики управления. Так же в функции управления входит адекватная реакция на возмущающие воздействия внутреннего и внешнего характера, направленная на их подавление или сведение их к минимуму [5, 6].

Совместное адекватное функционирование объекта, подвергаемого воздействию на него с целью повышения его эффективности работы, и системы управления им является главной задачей автоматической системы управления [7, 8, 9].

Системы, содержащие в своей структуре интеллектуальные блоки управления механизмами, используют аппараты нечеткой логики и нейросетевые структуры, находят применение на объектах для подъема и перемещения грузов, разновидностью которых является подъемно-поворотный стол, совмещающий в себе несколько видов движения, что позволяет сократить количество задействованного в технологическом процессе оборудования.

При исследовании основное внимание уделялось разработке и анализу принципиально новых систем управления, работающих в оптимизированном режиме за счет внедрения в них аппаратов нечеткой логики, блоков, содержащих нейронные сети и нейро-нечеткие объекты.

Питтс и Маккаллох, еще в 1943 году, занимались математическим моделированием нейронов.

Розенблатт издал датированную 1961 годом работу, посвященную персептрон – нейронной системе с элементарным алгоритмом обучения. Особенностью системы данного типа было то, что установка весовых коэффициентов происходит вручную.

Вопросами создания нечетких множеств начал заниматься еще в 1965 году Заде. Толчком к его исследованиям стал, тот факт, что принципы построения систем по классическим теориям не давали необходимых показателей, в связи с постоянным усложнением систем и повышением требований, предъявляемых к ним.

Критические недостатки персептрона были выявлены Пейпертом и Минским в 1969 году, они были связаны с тем, что персептроны неустойчивы при расчете общих функций.

Минский в 1970-м году ввел такое понятие, как фреймы – это методы формирования информационного потока в нейронных сетях в символической форме.

Первое практическое применение систем подобного рода датируется 1975 годом. Именно в это время создается благодаря практической реализации появившейся теоретической базы контроллер на базе нечеткой логики Ассилианом и Мамдани, который осуществлял регулирование параметров парового двигателя.

Следующим шагом стало создание промышленного контроллера благодаря Остергаду и Холмбладу, в основе работы данной разработки лежат лингвистические правила нечеткой логики.

Далее появляется теорема Каско, в которой было доказано, что языковые высказывания при использовании формализации, базирующейся на основе нечеткой логики, могут служить отражением взаимосвязи между входными и выходными сигналами без использования громоздких математических вычислений.

Сети Хопфилда, получившие название в честь своего разработчика, были созданы в 1980-м году, данный тип нейронных сетей уже позволил заниматься решением задач разного уровня сложности.

Хехт-Нилсен в 1986 году представил общественности нейронную сеть, работающую по принципу встречного распространения. Которая позволила, используя теорему Колмогорова, доказать теорию о том, что при присутствии в нейронной сети скрытых сегментов, она может являться отражением непрерывных функций [10, 11, 12].

Все приведенное выше, говорит о том, что наработки в области нейронных сетей постоянно совершенствуются. А использование в системах управления промышленными объектами блоков, содержащих интеллектуальные алгоритмы, позволит ускорить адаптацию систем к возмущающим воздействиям разного рода, улучшить качество переходных процессов.

Как и во многих областях, в области интеллектуального управления существует множество нерешенных вопросов и вопросов, на которые еще нет возможности дать однозначный ответ.

Данная работа направлена на исследование систем управления с внедрением в них разных типов управления интеллектуального характера, с выявлением наиболее оптимальной структуры для рассматриваемого объекта. С анализом возможности

чередования, при смене режима работы механизма, используемых в системе управления интеллектуальных блоков коррекции сигналов.

#### **Литературный обзор (Literature Review)**

Рассматривая классические методы управления, можно сделать вывод о том, что в их основе лежит регулирование процессов, происходящих в системах со звеньями невысоких порядков, имеющими динамический линейный характер. Однако для достижения необходимы форм характеристик, как по скорости их формирования, так и по виду, не всегда хватает функционала, который дают имеющиеся классические регуляторы [13].

Необходимость в использовании регуляторов, на базе нечеткой логики, возникает при автоматизации технологических процессов, в которых использование классических методов вызывает затруднения или не приемлемо для получения желаемых результатов [14]. В аппарат нечеткой логики входят понятия, основанные на человеческом мышлении, когда информация об объекте не имеет точных данных, а лежит в определенном диапазоне.

Реализация принципов нечеткой логики происходит с помощью электронных вычислительных машин позволяющих осуществить переход от переменных с лингвистическим характером к переменным с числовым характером. В работе [15] рассмотрены существующие методики моделирования, базирующиеся на правилах, логических и гибридных моделях, автор коснулся проблем, которые существуют в области нечеткого моделирования. Затронут традиционный подход, базирующийся только на применении элементов нечеткой логики, и приведен подход, актуальный в настоящее время, в основе которого лежат нечеткие модели как систем с разным уровнем и сложностью управления, так и объектов управления. Уделено внимание устойчивости линейных систем.

В работе [16] уделено внимание продукционным правилам, используемым в системах с нечеткой логикой. Данные правила оперируют переменными лингвистического характера в отличие от классического подхода к правилам продукционного характера.

Блоки нечеткой логики представляют собой объекты с нечетким или нечеткими логическими входами и нечетким логическим выводом. Переход к числовым значениям выходного сигнала осуществляется с помощью определенных методов или специальных математических зависимостей.

Процесс нечеткого управления состоит из нескольких этапов:

- осуществление фаззификации;
- составление рабочих нечетких правил (базы правил);
- процесс дефаззификации.

На текущий момент широко используются сформировавшиеся с течением времени и ставшие классическими функции Z – типа, П – типа, Л – типа, S – типа. Данные функции позволяют справиться со многими задачами, но при нестандартной задаче, может возникнуть необходимость в создании функции иного вида.

Под нейронными сетями понимаются некие структуры вычислительного типа способные моделировать процессы идентичные тем, что происходят в человеческом мозге. Внешне они выглядят как системы параллельного и распределительного типа. Данные системы обучаемы, данный процесс формируется путем воздействий разного характера. Элементарной частицей данного типа сетей являются нейроны [15]. Пороговый бинарный элемент (основная модель нейрона) служит для определения значения сигнала на выходе, при этом формирование нулевого значения происходит, если величина выходного значения меньше заданного параметра, при других обстоятельствах происходит формирование единичного сигнала. Входными сигналами нейрона могут быть как один сигнал, так и несколько. Каждый из подаваемых на вход нейрона сигналов перетерпевает увеличение на множитель, соответствующий его весу (имеется зависимость между состоянием нейрона и величиной домножения входного сигнала). Далее происходит суммирование всех приведенных к состоянию нейрона входов. Процесс формирования из нейронов нейросети разнообразен, высокая точность приписывается многослойным сетям с прямым действием. Формирование нечеткого вывода происходит путем приведения полученных результатов к четкости [16].

В настоящее время системы, имеющие в своем составе нейронные сети, нашли применение для решения сложных задач, в которых необходим анализ и обработка большого массива данных.

Процесс исторического развития сетей происходил поэтапно, при решении

сложных задач, на смену нейронным сетям прямого действия, пришли сети с обратными связями в виде сетей, выполняющих процесс обучения без учителя, сетей Кохонена, сетей Хопфилда, сетей, базирующихся на теории адаптивного резонанса.

Благодаря применению систем управления, содержащих блоки нечеткой логики или имеющих в своей структуре нейронные сети, появилась возможность построения систем, отображающих более точно процессы, происходящие на реальном объекте. Проблемным моментом в системах подобного рода является то, что нечеткая система обрабатывает значительный объем информации о реальном объекте, что является большой нагрузкой для аппаратной части, при этом не все объекты имеют такой объем необходимых ресурсов [14].

Рассматриваемый подъемно-транспортный механизм для перемещения грузов функционирует по определенному алгоритму, заключающемуся в процессе разгона до выхода на номинальное значение скорости, далее происходит поворот стола при номинальном значении скорости с последующим процессом торможения, при котором значение скорости лежит в диапазоне от номинального значения до нулевого (остановка механизма).

Установленный на рассматриваемом механизме регулятор положения позволяет осуществлять остановку объекта в одну ступень, при этом не имеется возможность выполнить двухступенчатое торможение, путем плавной остановки на ползучей скорости, не смотря на возможности двигателя в данном направлении.

В настоящее время система управления подъемно-поворотным механизмом нуждается в усовершенствовании, главная задача которого заключается в нахождении оптимального значения точки начала торможения зависящей от степени загруженности устройства. Также существующая система управления не обеспечивает плавность пуска механизма.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

На рассматриваемом объекте за показатели переменного типа были приняты величина угла поворота стола и данные по скорости поворота. На реальном объекте угол поворота стола лежит в диапазоне от 0 до 180 градусов. Активно применяемые в нечетких системах термы, служащие для оценки фаззи-множеств с позиций качественных показателей, были выбраны как для угла поворота, так и для скорости, их структура приведена на рисунке 1. Скоростные показатели были определены при моделировании фаззи-регулятора с позиций восприятия информации человеком с целью обеспечения плавного пуска и останова агрегата. Диапазон от 0 до 1 был выбран для функциональных значений переменных.

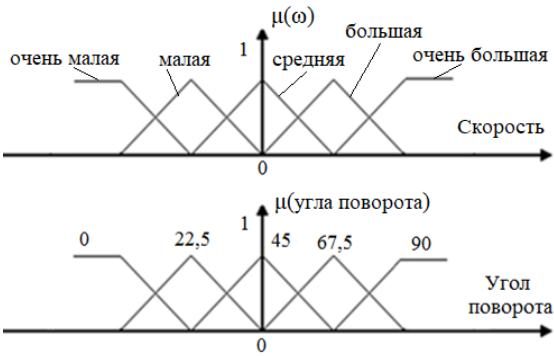


Рис. 1. Переменные, используемые для реализуемой системы управления и их функции принадлежности

Fig. 1. Variables used for the control system being implemented and their maintenance function

На следующем этапе была создана база, отражающая работу нечеткого регулятора (таблица 1).

Таблица 1

Правила, описывающие работу регулятора на базе нечеткой логики при повороте стола на 90 градусов

Угол	Скорость				
	Очень маленькая	Маленькая	Средняя	Большая	Очень большая

0	Средняя	Средняя	Маленькая	Маленькая	Очень маленькая
22,5	Большая	Средняя	Средняя	Маленькая	Маленькая
45	Очень большая	Большая	Средняя	Средняя	Маленькая
67,5	Очень большая	Очень большая	Большая	Средняя	Средняя
90	Очень большая	Очень большая	Очень большая	Большая	Средняя

При моделировании на первоначальном этапе была использована одномассовая модель, содержащая в системе управления ПИД-регулятор, перемещение стола рассматривалось при угле поворота на 90 градусов (рис. 2) и угле поворота на 180 градусов (рис. 3), имитация угла поворота происходила с помощью блоков, выдающих сигнал на величину угла поворота, что позволило смоделировать поворот стола при установившемся значении скорости и осуществить настройку времени торможения, для обеспечения точности моделирования. На основании анализа полученных характеристик, можно сделать вывод, что дотягиваний при формировании перемещения на графиках не наблюдается, что говорит о неплохом быстродействии системы.



Рис. 2. Формирование тока, скорости и угла поворота в одномассовой системе при повороте стола на 90 градусов

Fig. 2. Formation of current, speed and angle of rotation in a single-mass system when turning the table by 90 degrees

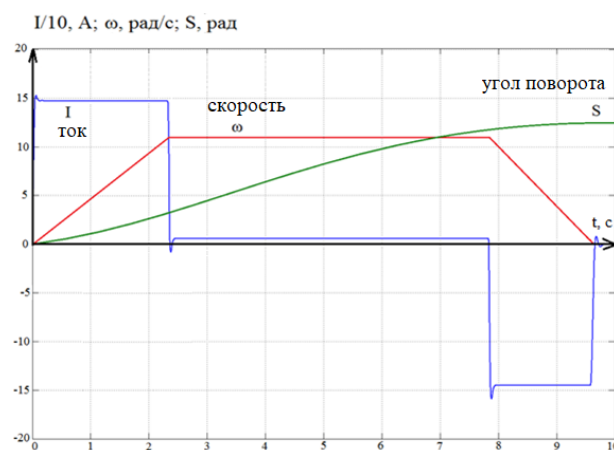


Рис. 3. Формирование тока, скорости и угла поворота в одномассовой системе при повороте стола на 180 градусов

Fig. 3. Formation of current, speed and angle of rotation in a single-mass system when turning the table by 180 degrees

На следующем этапе на основе одномассовой системы, показавшей хорошую работоспособность, была разработана двухмассовая система, учитывающая колебания электромеханической части системы. Результаты моделирования при разных углах поворота стола представлены на рисунках 3 и 4, в данном случае величина статического момента была при моделировании приравнена к нулю.

Рассмотрев полученные графики переходных процессов, можно говорить о том, что учет связанных инерционных масс, имеющих место в действующих электромеханических системах, отражается в виде значительного количества колебаний присутствующих при формировании переходного процесса. Наибольшее количество колебаний характерно для системы, в которой поворотный механизм перемещается на

угол, соответствующий 180 градусам, следовательно, для дальнейшего исследования целесообразно проводить корректирующие мероприятия, направленные на снижение процессов колебательного характера именно в данной системе.

При учете момента перемещаемого груза, который равен величине номинального момента было выполнено моделирование двухмассовой системы, полученные результаты приведены на рисунке 5. На полученных характеристиках можно увидеть характерную реакцию системы на приложенный момент, в виде уменьшения устойчивости системы, в связи с увеличением количества колебаний на всем этапе формирования процесса работы механизма.

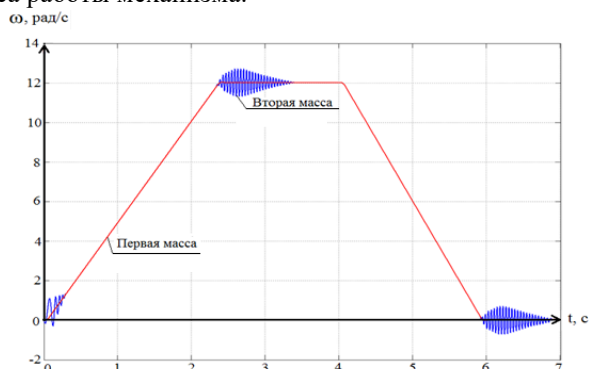


Рис. 4. Формирование скорости двухмассовой системе при повороте стола на 90 градусов

Fig. 4. Forming the speed of the two-mass system when turning the table by 90 degrees

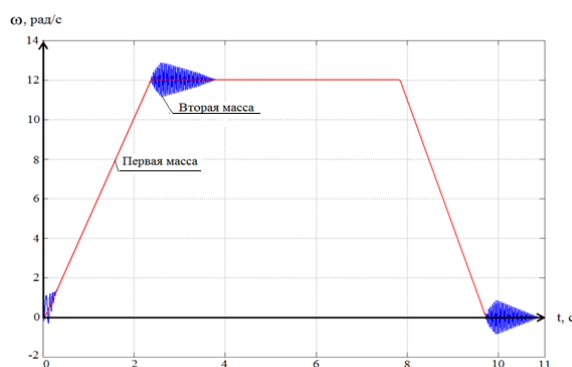


Рис. 5. Формирование скорости в двухмассовой системе при повороте стола на 180 градусов

Fig. 5. Speed formation in a two-mass system at 180 degree table rotation

В среде *Matlab* было выполнено моделирование системы управления с блоком, играющим роль нечеткого регулятора, реализация регулятора возможна благодаря расширению *Fuzzy Logic Toolbox*. Последовательность отстройки под рабочее состояние регулятора происходила путем прописания кода программы, позволяющего при запуске системы и использовании файла модели приводить контроллер в рабочее состояние совместно с системой, в которой он установлен. Полученный при этом результат отражен на рисунке 6, в данном случае моделировании также происходило при приложенной нагрузке, равной номинальному значению.

Применение регулятора нечеткого типа позволило значительно снизить колебательность системы. Примерно в 2,2 раза на всех этапах формирования графика скорости (при пуске, торможении и при установившемся показателе скорости) наблюдается снижение амплитуды колебаний.

Путем компиляции программного кода возможно использование предлагаемого регулятора на реальных объектах, имеющих необходимое программное и ресурсное обеспечение.

Проведем исследование системы с присутствием в ее структуре нейросетевого контроллера, в качестве которого выбран контроллер *NARMA-L2*, реализующий многослойную нейронную сеть. Для обеспечения функционирования устройства контроллер необходимо обучить, базируясь на первоначальной модели, содержащей ПИД-регулятор, который является регулятором положения и будет использоваться в данном случае в качестве учителя, также необходимо прописать путь к модели учителя. Процесс настройки параметров нейрорегулятора заключается в вводе в окне настройки названия файла учителя, указания размера скрытого слоя, длины обучающей выборки и

необходимого числа обучающих циклов. После обучения сети, для ускорения дальнейших исследований сохраняем с целью последующего использования созданный файл, он будет иметь расширение *mat*. При дальнейшем использовании существует возможность загрузки уже созданного файла, что исключает необходимость в повторном обучении, занимающем длительный промежуток времени.

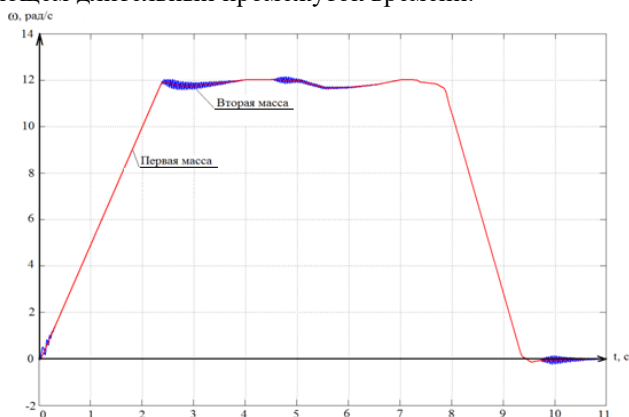


Рис. 6. Формирование скорости в двухмассовой системе при присутствии в системе регулятора нечеткого типа

*Fig. 6. Speed formation in a two-mass system in the presence of a fuzzy type of controller*

Нейронный регулятор по сравнению с нечетким регулятором не требует для своей работы создания строго ограниченной базы правил, выход за пределы которой ведет к нарушению устойчивой работы системы управления. Применение нейронного регулятора характеризуется снижением численности настроек, присутствием автоматической корректировки показателей в заданной области. Моделирование системы с данным типом регулятора дало следующие показатели, представленные на рисунке 7. Исследование в данном случае проводилось при приложенной нагрузке, равной номинальному значению.

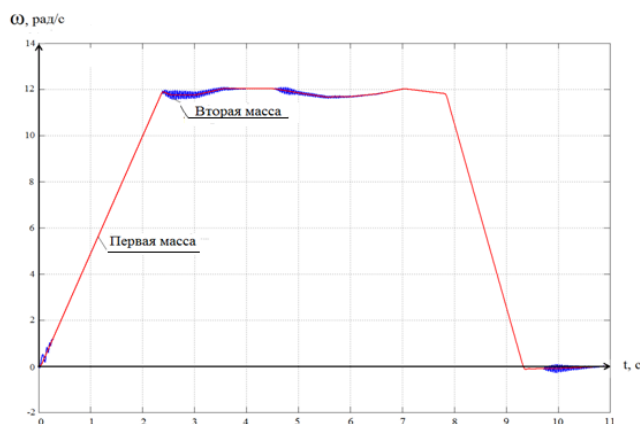


Рис. 7. Формирование скорости в двухмассовой системе при присутствии в системе регулятора нейронного типа

*Fig. 7. Speed formation in a two-mass system in the presence of a neural type regulator*

Очевидно явное снижение колебательности системы приблизительно в 3,45 раза по сравнению с системой содержащей стандартный регулятор. Данный тип регулятора при работе обращается к модели учителя, данная операция приводит к необходимости потребления некоторого количества памяти, как для хранения данных, так и для быстрого отклика, связанного с обработкой данных в реальном времени. Данные манипуляции ведут к увеличению нагрузки на процессор, что не всегда может быть приемлемым.

При превышении нагрузки на процессор выше допустимого значения предлагается использование вместо нейронного регулятора нейронного супервизора, являющегося самоорганизующейся рекуррентной сетью, в которой присутствуют обратные связи, использование данного типа сетей приведет к значительной разгрузке процессора при анализе данных. Реализация модели нейронного супервизора, предлагается с использованием блоков, осуществляющих выборку и хранение выходных



параметров. Также предусмотрен в предлагаемом супервизоре блок задержки сигнала, формирующегося на выходе, с целью формирования данных по предыдущей выборке до осуществления считывания информации по новой выборке. Полученный супервизор представлен на рисунке 8. Все части представленного супервизора, П-часть, И-часть, Д-часть представляют собой отдельные подсистемы, в которых возможно регулировать значение коэффициентов, для объединения их в ПИД тип необходим сумматор. Результаты моделирования двухмассовой системы с блоком ПИД-типа приведены на рисунке 9, исследование, как и в рассмотренных ранее системах было выполнено при моменте равном номинальному значению.

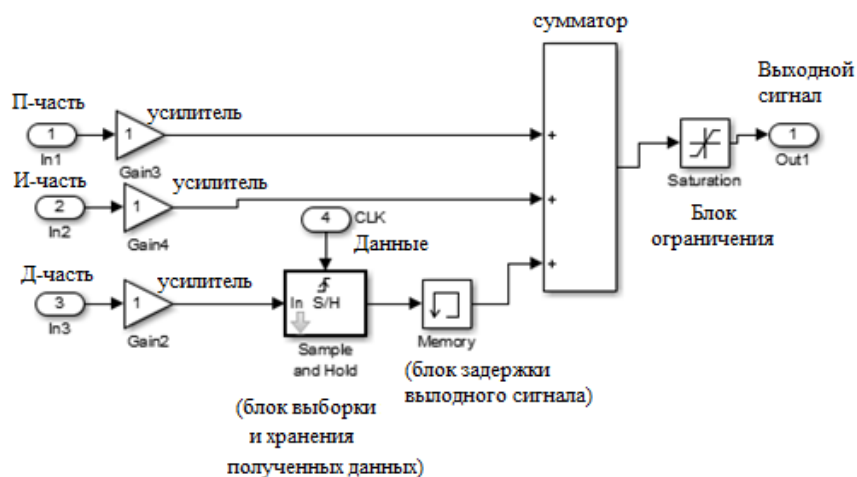


Рис. 8. Супервизор, учитывающий все коэффициенты регулятора ПИД типа

Fig. 8. Supervisor, taking into account all the factors of the PID regulator type

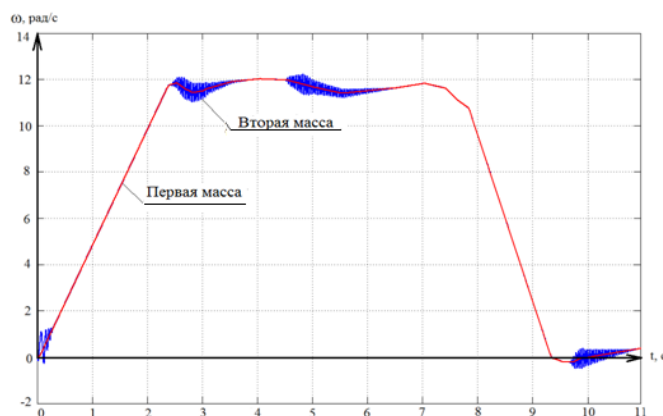


Рис. 9. Формирование скорости в двухмассовой системе при присутствии в системе супервизора

Fig. 9. Speed formation in a double-mass system in the presence of a supervisor

Благодаря введению различных значений коэффициентов в регуляторе ПИД типа можно производить корректировки каждой из его частей, для получения желаемого результата. Полученный на рисунке 9 результат, позволяет сделать вывод о том, что колебательность переходного процесса снизилась примерно в 1,68 раза.

Использование в рассматриваемой системе нейро-нечеткого регулятора также позволяет добиться хороших результатов с позиций повышения устойчивости системы. В основе работы данного типа регулятора лежит принцип функционирования ANFIS-сетей, процесс обучения которых основан на использовании метода с обратным распространением ошибки, параллельно с методикой наименьших квадратов. В системе для нахождения желаемого отклика сети происходит определение необходимых для этого значений параметров за счет наличия связи между реальным и оптимальным поведением сети. Формирование показателей функций принадлежности при обучении происходит в зависимости от показателей рассогласования между желаемыми и полученными данными. Приведенный на рисунке 10 переходный процесс отражает положительные результаты с позиций уменьшения колебательности переходного процесса, за счет на оптимизацию регулятора нечеткого типа путем его обучения

посредством нейронной сети.

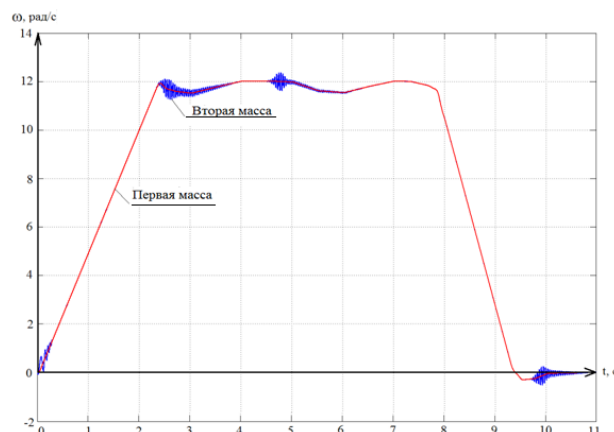


Рис. 10. Формирование скорости в двухмассовой системе при присутствии в системе контроллера, базирующегося на ANFIS-сети

Fig. 10. Speed formation in a two-mass system when there is an ANFIS-based controller in the system

### Результаты и обсуждения (Results and Discussions)

Сравним результаты колебаний при переходном процессе во второй массе двухмассовой системы при использовании разных типов регуляторов в системе управления подъемно-поворотным механизмом (рис. 11).

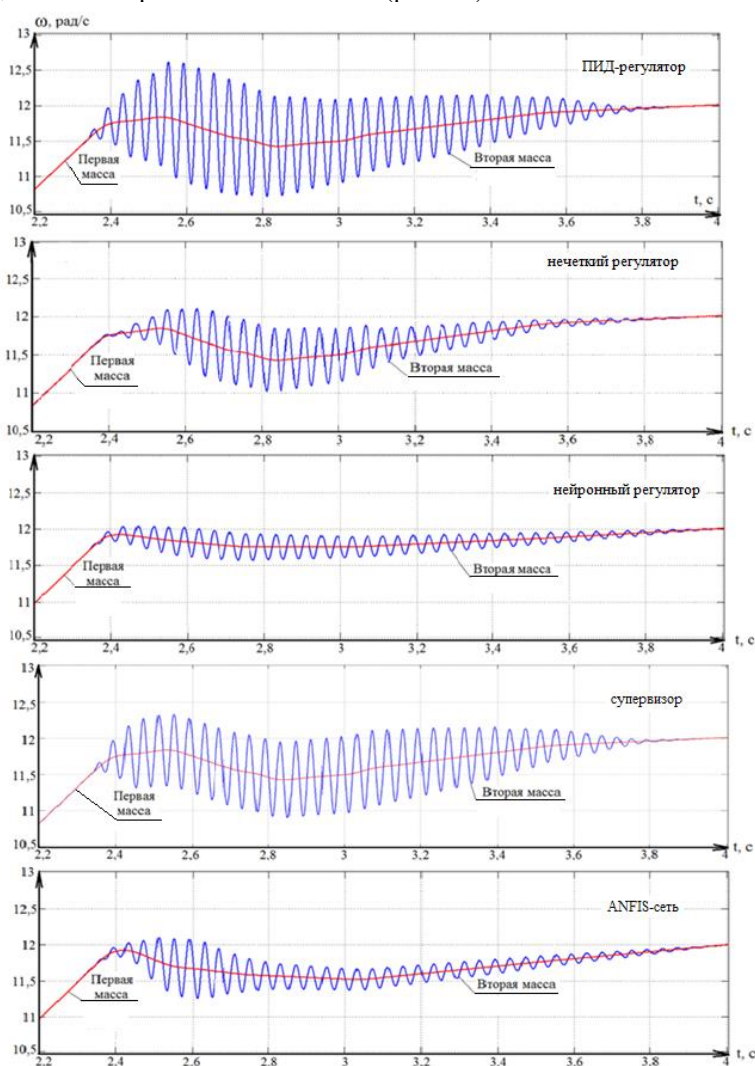


Рис. 11. Анализ использования разных типов регуляторов

Fig. 11. Analysis of use of different types of regulators

Использование сети ANFIS позволило уменьшить колебания примерно в 2,9 раза

по сравнению с системой с регулятором ПИД типа; в 0,75 раза по сравнению с регулятором нечеткого типа. Но введение в систему управления нейронного регулятора дает лучшие показатели, чем использование сети *ANFIS*, в данном случае наблюдается снижение колебательности процесса формирования скорости примерно в 0,48 раза.

Одновременно использование нейро-нечеткого типа регулятора позволяет выполнять настройку параметров регулятора более точно, не создает весомой нагрузки на процессор.

Не смотря на наличие в системах с нейро-нечеткими и нейронными типами регуляторов перерегулирования, в графиках видна тенденция снижения амплитуды колебаний переходного процесса.

#### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

Использование нечетких технологий при разработке регуляторов в системах управления подъемно-транспортными механизмами приводит к значительному снижению колебаний скорости при формировании переходных процессов по сравнению со стандартным типом регулятора.

На дальнейшем этапе исследования планируется внедрение в систему управления гибридной системы регуляторов, в зависимости от этапа переходного процесса в систему будет вводиться тот или иной тип регулятора.

Практическая реализация предлагаемых типов управления возможна на программном уровне внутри контроллера путем интеграции из среды *Matlab Simulink* в программную среду Step программного года.

Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям) на основании договора №17227ГУ/2021 от 22 декабря 2021 года.

#### **Литература**

1. Ланграф С.В, Сапожников А.И., Глазырин А.С., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Динамика электропривода с нечетким регулятором // Известия Томского политехнического университета. – 2010. Т. 316. №4. С. 168-173.
2. Синюкова Т.В., Синюков А.В., Грачева Е.И, Kolsun M.. Нейросетевые технологии в системах управления механизмами перемещения грузов Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022 г. Т. 24. № 2. С. 107-118.
3. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. – 2019. pp. 320-324.
4. Sinyukova T.V., Gladyshev V.E., Sinyukov A.V. Methods for Reducing Electromechanical Oscillations in Conveyor Control Systems // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. – 2019. pp. 435-439.
5. Буянкин В.М. Элементы искусственного интеллекта в системах управления электроприводом с нечеткой логикой // Тенденции развития науки и образования. – 2020. № 60-2. С. 8-13.
6. Белов А.М., Белов М.П. Применение нейронных сетей в электроприводных системах насосных агрегатов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2022. Т. 1. С. 91-94.
7. Ямковая М.А., Шадрин С.В. Нейроуправление электроприводом с переменным моментом инерции // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2020. № 3 (8). С. 45-55.
8. Danila A. Dementev, Ekaterina D. Maximova, Ivan A. Sysoletin, Alexandr V. Andrushin. Research of the effect of an additional signal on the control process of a single-circuit automatic control system with a neuroregulator // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – 2021. 20608282.
9. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2022. 22186939.
10. Wan qiaoYuan, Ying yuan Xiao, Xu Jia, Ying Ming. Neural Network Detection of Shilling Attack Based on User Rating History and Latest Features // 2019 International

Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI). – 2019. 19246289.

11. Yuxiang NIU, Hui LI, Feiyang LIU. A Loss-aware Continuous Hopfield Neural Network (CDN)-based Mapping Algorithm in Optical Network-on-Chip (Noc) // 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICON). – 2022. 22115387.

12. Hecht-Nielsen R. Neurocomputing: picking the human brain // IEEE Spectrum. – 1988. 3143635.

13. Jianyang Tian, Guangyu Zhang, Jin Wu, Wenting Li. The fuzzy human-simulated intelligent control for hot-rolling strip width // Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2012. 13166720.

14. Кузьмин А.В., Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика: монография. – М.: НТИ «Горячая линия-Телеком». – 2004. 143 с.

15. Макаров И.М., Лохин В.М., Масько С.В., Романов М.П., Ситников М.С. Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления // Информационные технологии. – 2013. №S2. С. 1-32.

16. Цыпкин Я.З. Адаптивные методы выбора решений в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 1976. №4. С. 78-91.

#### Авторы публикации

**Синюков Алексей Владимирович** – аспирант Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

**Синюкова Татьяна Викторовна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электропривода», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: stw0411@mail.ru.

**Абдуллазянов Эдвард Юнусович** – канд.техн.наук., ректор Казанского государственного энергетического университета.

**Грачева Елена Ивановна** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, e-mail: grachieva.i@bk.ru

**Мещеряков Виктор Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривода», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: mesherek@yandex.ru.

**Stanimir Valtchev** – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

#### References

1. Langraf SV, Sapozhnikov AI, Glazyrin AS, et al. Dynamics of an electric drive with a fuzzy controller. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2010;316(4):168-173.

2. Sinyukova TV, Sinyukov AV, Gracheva EI, et al. Neurosetevye tekhnologii v sistemakh upravleniya mekhanizmami peremeshcheniya грузов *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy ehnergetiki*. 2022;24(2):107-118.

3. Sinyukova TV, Sentsov EV, Sinyukov AV. *Neural Network Speed Observers*. 2019 *1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019*. 2019. pp. 320-324.

4. Sinyukova TV, Gladyshev VE, Sinyukov AV. *Methods for Reducing Electromechanical Oscillations in Conveyor Control Systems*. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. – 2019. pp. 435-439.

5. Buyankin V.M. Ehlementy iskusstvennogo intellekta v sistemakh upravleniya

ehlektroprivodom s nechetkoi logikoi. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. –2020;60;2(8-13).

6. Belov A.M., Belov M.P. Primenenie neironnykh setei v ehlektroprivodnykh sistemakh nasosnykh agregatov. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam*. 2022;1:91-94.

7. Yamkovaya MA, Shadrin SV. Neiroupravlenie ehlektroprivodom s peremennym momentom inertsii. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami*. 2020;3 (8):45-55.

8. Dementev DA, Maximova ED, Sysoletin IA, et al. *Research of the effect of an additional signal on the control process of a single-circuit automatic control system with a neuroregulator*. 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2021. 20608282.

9. Klepikov VB, Bieliaiev OS. *Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load*. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2022. 22186939.

10. Wan qiaoYuan, Ying yuan Xiao, Xu Jia, et al. *Neural Network Detection of Shilling Attack Based on User Rating History and Latest Features*. 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI). – 2019. 19246289.

11. Yuxiang NIU, Hui LI, Feiyang LIU. *A Loss-aware Continuous Hopfield Neural Network (CDN)-based Mapping Algorithm in Optical Network-on-Chip (Noc)*. 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICON). – 2022. 22115387.

12. Hecht-Nielsen R. *Neurocomputing: picking the human brain*. IEEE Spectrum. – 1988. 3143635.

13. Jianyang Tian, Guangyu Zhang, Jin Wu, et al. *The fuzzy human-simulated intelligent control for hot-rolling strip width*. Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2012. 13166720.

14. Kuz'min AV, Uskov AA. *Intellectual'nye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennye neironnye seti i nechetkaya logika: monografiya*. M.: NTI «Goryachaya liniya-TelekoM». 2004. 143 s.

15. Makarov IM, Lokhin VM, Mas'ko SV, et al. Ustoichivost' intellektual'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya. *Informatsionnye tekhnologii*. 2013;S2:1-32.

16. Tsyppin YAZ. Adaptivnye metody vybora reshenii v usloviyakh neopredelennosti. *Avtomatika i telemekhanika*. 1976;4:78-91.

#### Authors of the publication

**Alexey V. Sinyukov** - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

**Tatyana V. Sinyukova** - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

**Edvard Yu. Abdullazyanov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Elena I. Gracheva** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Viktor N. Meshcheryakov** - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

**Stanimir Valtchev** - New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

**Получено** 26.01.2023г.

**Отредактировано** 06.02.2023г.

**Принято** 06.02.2023г.