

Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости

В работе представлено моделирование интеллектуальной системы управления электроприводом (СУЭП) постоянного тока с двухзонным регулированием скорости с применением теории нечетких множеств. Реализована развитая нечеткая СУЭП с двухзонным регулированием скорости. Представлен сравнительный анализ результатов моделирования интеллектуальной системы управления и системы электропривода с применением классических подходов настройки регуляторов, а также выявлены достоинства и недостатки использования мягких вычислений в системе интеллектуального управления электроприводом постоянного тока. Исследованы динамические характеристики классической и интеллектуальной систем управления. Внедрение многокаскадности нечеткого регулятора в интеллектуальные системы управления, где внешний каскад нечеткого модуля рассматривается в роли экспертной системы, управляющей регуляторами вложенного каскада, позволяет снизить информационную нагрузку продукционной базы знаний, количество лингвистических переменных, а также сократить алгоритмическую сложность в блоках фаззификации и дефаззификации. Алгоритмы и процедуры, применяемые в многокаскадных нечетких регуляторах, могут быть использованы в качестве модулей прогнозирования в развитых объектах автоматизации, например в системах управления электроприводами с двухзонным регулированием, а также аналогичных технологических процессах, применяемых в электроэнергетике, робототехнике и на транспорте. Данный подход позволяет нечеткой многокаскадной системе управления сочетать различные структурные решения по настройке регуляторов, получая при этом качественные характеристики переходных процессов, и расширять интеллектуальные возможности нечетких систем управления путем их структурного и функционального объединения в многокаскадные структуры для решения задач регулирования сложными технологическими процессами в условиях многокритериальности, многозадачности и многокоординатности.

Ключевые слова: система управления электроприводом, двухзонное регулирование, алгоритмы нечеткого вывода, нечеткий логический регулятор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получают интеллектуальные системы управления и принятия решений [1]. Проектирование систем регулирования с применением мягких вычислений представляет собой проблему, не поддающуюся алгоритмизации. Нечеткие подходы при разработке систем управления целесообразно использовать в тех случаях, когда при описании технических систем присутствует некоторая неопределенность, которая существенно затрудняет применение точных количественных методов. Для большинства сложных систем достаточно трудно обеспечить полную наблюдаемость объекта управления. Кроме того, для таких систем управления весьма сложно получить полное математическое описание объекта, что приводит к необходимости принимать существенное количество допущений, которые в значительной степени приводят к снижению как статических, так и динамических показателей системы.

В таких проблемных ситуациях системы управления на базе нечеткой логики дают более адекватные результаты по сравнению с классическими подходами без существенной потери качества управления. Синтез нечеткого регулятора может осуществляться на основе общих представлений эксперта или специалиста о поведении системы [2].

В настоящее время системы, построенные на принципах нечеткой логики, находят свое применение

во многих сферах человеческой деятельности и области их использования постоянно расширяются. Такие системы используются при управлении сложными технологическими процессами, при управлении бизнес-процессами, в системах поддержки принятия решений, при создании различных приборов и бытовой техники [3].

На сегодняшний день базовым звеном большинства технологических объектов составляет регулируемый электропривод. Это обусловлено целым спектром достоинств такого типа преобразователя энергии. Однако и данному виду регулируемого элемента как составляющей системы управления присущ ряд недостатков, которые выступают в виде сдерживающих факторов.

Для целого ряда технологических механизмов (концевые моталки, прокатные станы, металлорежущие станки и т.п.) в качестве преобразователя электрической энергии в механическую используются электроприводы постоянного тока с двухзонным регулированием скорости. Двухзонное регулирование скорости систем электропривода применяется в производственных механизмах, у которых работа на скорости выше номинальной происходит с малым моментом сопротивления на валу и, наоборот, на низкой скорости необходимо наиболее высокое (номинальное) значение момента. Использование двухзонного регулирования связано, прежде всего, с требованием повышения скорости обработки изделий и тем самым повышения производительности или рядом технологических требований [4].

КЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СУЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Классический подход при реализации СУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости базируется на линеаризации характеристик звеньев системы электропривода [5]. Один из возможных вариантов построения двухканальной СУЭП приведен на **рис. 1**, на котором показана имитационная модель этой системы в среде *Matlab*. Для компенсации нелинейностей, обусловленных блоками произведения, в контурах регулирования скорости и ЭДС двигателя на выходах регуляторов скорости и ЭДС включены блоки деления. Нелинейности типа «звено насыщения» в рассматриваемой модели используются для ограничения выходной координаты соответствующего звена. Нелинейность в контуре регулирования магнитного потока строится на основании универсальной кривой намагничивания двигателя, гистерезисом кривой пренебрегаем.

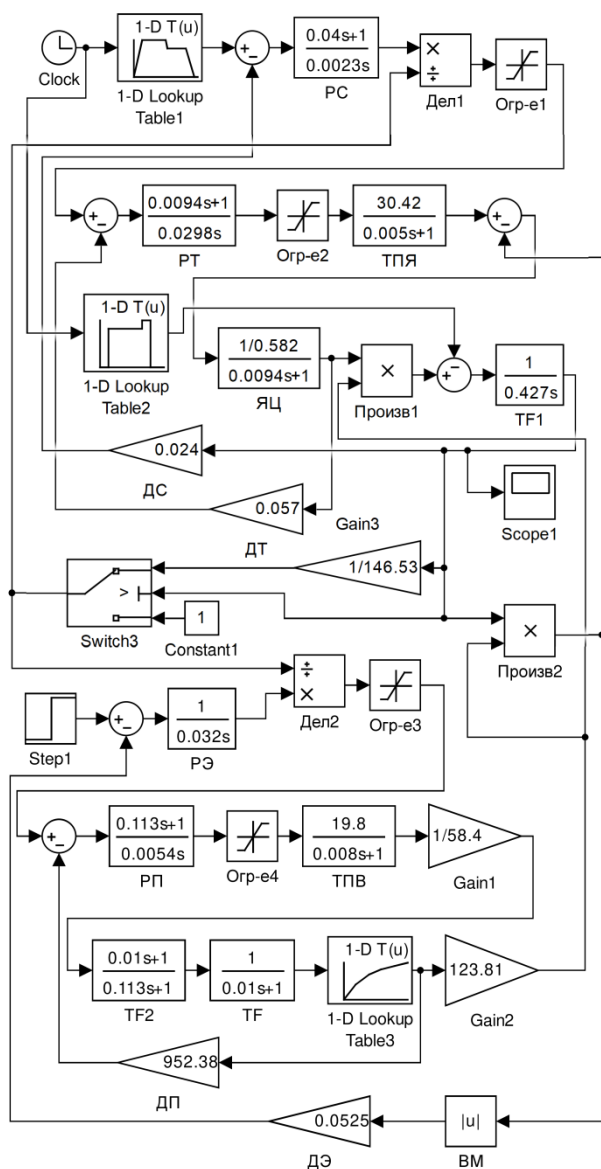


Рис. 1. Имитационная модель системы управления с двухзонным регулированием скорости

В дальнейшем при синтезе интеллектуальной системы регулирования приведенная математическая модель СЭУП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости принимается за основу.

Исследование системы управления проводилось в виде реакции системы на отработку управляющего сигнала сложной формы при резко переменной нагрузке на валу двигателя [6].

На **рис. 2** и **3** приведены кривые изменения задающего и возмущающего сигналов в режиме работы привода в основной зоне. Задающий сигнал напряжением 3,5 В соответствует номинальной скорости.

Кривые изменения задающего и возмущающего сигналов в режиме работы привода выше номинальной скорости приведены на **рис. 4** и **5**.

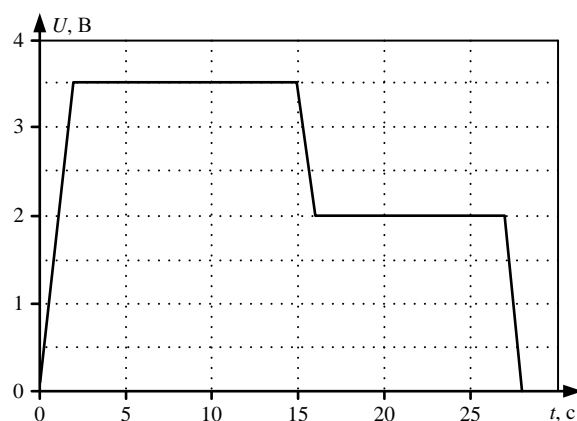


Рис. 2. Форма задающего сигнала в режиме «до номинальной скорости»

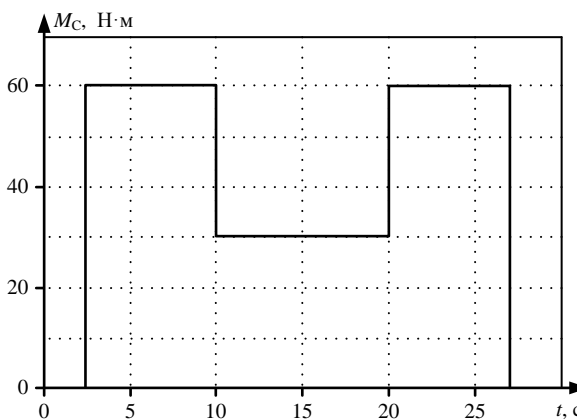


Рис. 3. Кривая изменения возмущающего сигнала в режиме «до номинальной скорости»

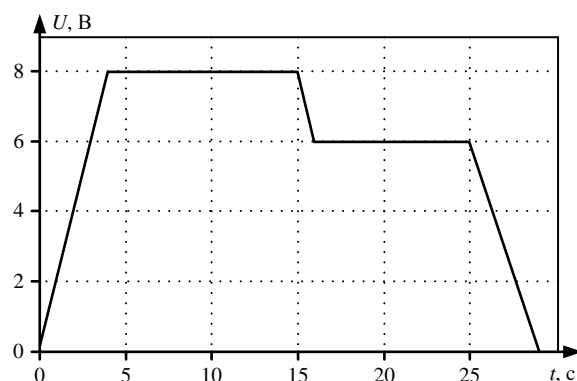


Рис. 4. Сигнал задания скорости в режиме «выше номинальной скорости»

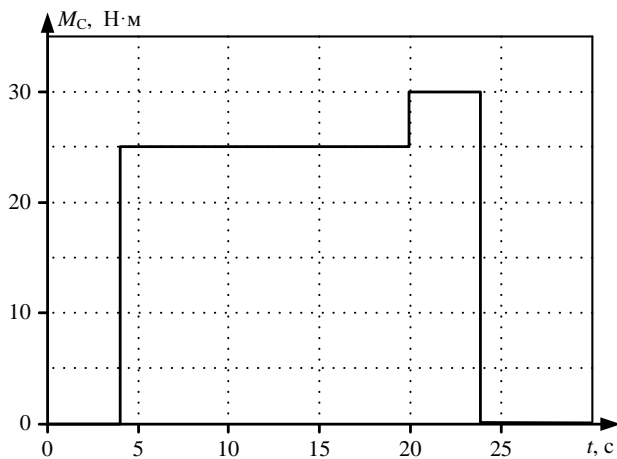


Рис. 5. Кривая изменения возмущающего сигнала в режиме «выше номинальной скорости»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СУЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ В РЕЖИМЕ ДО НОМИНАЛЬНОЙ И ВЫШЕ НОМИНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Основной целью задачи управления будет являться как ослабление влияния нестационарных параметров процесса на выходную величину, так и уменьшение неточности регулирования, обусловленной существенным количеством допущений и ограничений. Для достижения данной цели выполняется замена классического регулятора скорости на нечеткий логический регулятор (НЛР) [7]. Структурная схема нечеткой системы управления, настроенной на режим работы электропривода до номинальной скорости, представлена на рис. 6.

Синтез интеллектуальной системы управления двухзонным регулированием основан на применении нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани. Выбор такого алгоритма нечеткого логического вывода определяется как простотой структурных решений, так и гибкостью настройки самого алгоритма по отношению к другим аналогам. В качестве входной информации нечеткий регулятор принимает стандартный сигнал ошибки по скорости системы.

Простейший нечеткий модуль two_zone, представленный на рис. 7, реализующий функции регулятора скорости, может быть описан как звено, обладающее одним информационным входом и одним информационным выходом и формализующий в лингвистической форме понятия сигнала ошибки и сигнала управления по скорости соответственно.

Область определения входной лингвистической переменной OPS задается в диапазоне $[-0,155; 0,095]$, который соответствует изменению входного сигнала ошибки. Кроме того, базовое терм-множество этой переменной определяется набором из пяти значений. На рис. 8 представлено равномерное распределение функций принадлежности аппроксимированного типа в заданном диапазоне регулирования.

Аналогичным образом описывается понятие, формируемое выходным информационным каналом, соответствующее сигналу управления по скорости.

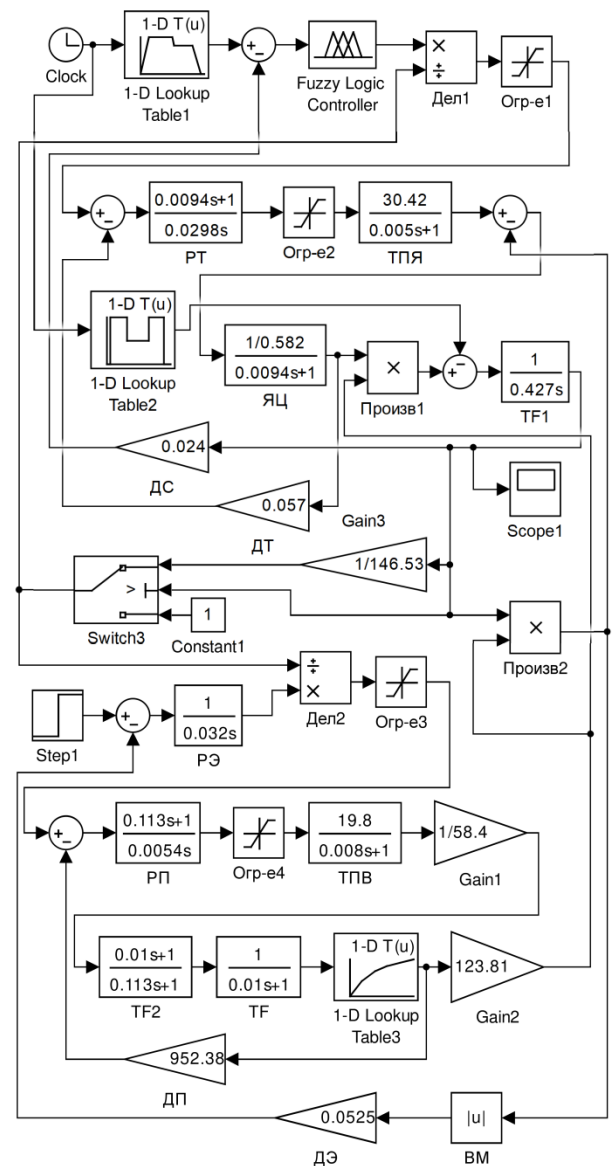


Рис. 6. Имитационная модель интеллектуальной СУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости в режиме «до номинальной»

Единственным важным отличием является изменение параметров области определения выходной лингвистической переменной $[-3,64; 3,78]$ (рис. 9).

Полнота и непротиворечивость используемого алгоритма вывода обеспечивается набором нечетких продукционных правил в количестве пяти соотношений:

1. Если «ошибка по скорости» есть mf1, то «выходное напряжение» есть mf1.
2. Если «ошибка по скорости» есть mf2, то «выходное напряжение» есть mf2.
3. Если «ошибка по скорости» есть mf3, то «выходное напряжение» есть mf3.
4. Если «ошибка по скорости» есть mf4, то «выходное напряжение» есть mf5.
5. Если «ошибка по скорости» есть mf5, то «выходное напряжение» есть mf5.

Результаты реакции моделей классической и нечеткой систем управления электропривода с двухзонным регулированием скорости на обработку задающе-

го воздействия режима «до номинальной скорости» приведены на **рис. 10**. Исходя из представленных результатов моделирования, можно сделать вывод, что полученная интеллектуальная система двухзонного регулирования обладает некоторыми преимуществами по быстродействию и перерегулированию относительно классического варианта.

Рассмотрим реализацию нечеткого закона управления в рассматриваемой системе при переходе ее в режим «выше номинальной скорости». Изменения в нечетком модуле будут связаны только с одним параметром – областью определения блоков фаззификации $[-0,17; 0,22]$ и дефаззификации $[-7,4; 16,56]$.

Согласно результатам моделирования нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при отработке задающего воздействия, приведенного на **рис. 4**, из **рис. 11** можно сделать вывод, что внедрение в систему интеллектуального регулятора, основанного на нечеткой логике, взамен классического аналога позволила добиться некоторого улучшения стабильности протекания процесса – отсутствуют колебания, наблюдаемые на графике отработки угловой скорости с применением классического регулятора скорости; при этом присутствует допустимое перерегулирование [8].

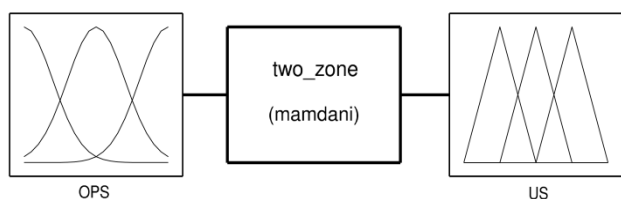


Рис. 7. Функциональная схема нечеткого регулятора two_zone

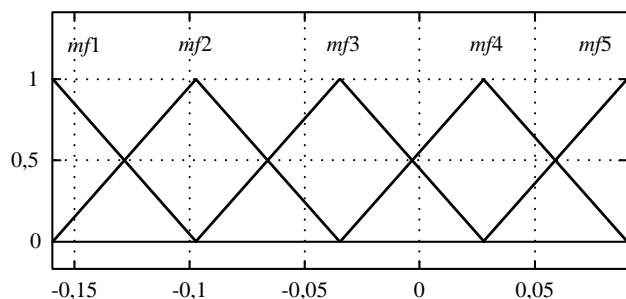


Рис. 8. Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по скорости»

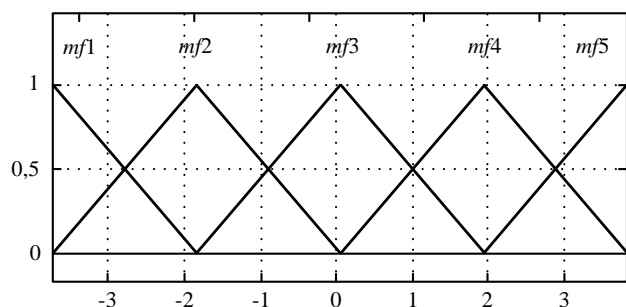


Рис. 9. Распределение термов лингвистической переменной «выходное напряжение»

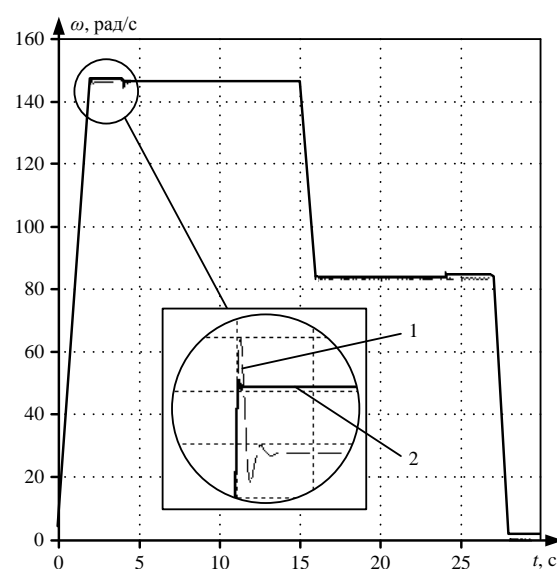


Рис. 10. Динамические характеристики отработки угловой скорости классической системы и нечеткой системы управления: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

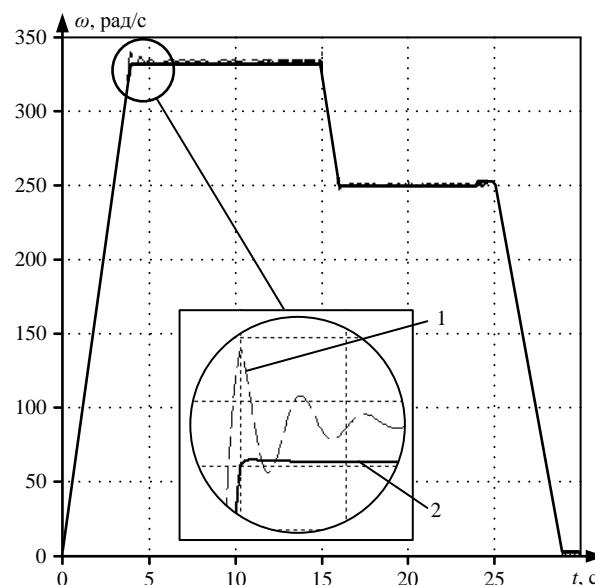


Рис. 11. Динамические характеристики отработки задающего сигнала классической и нечеткой системами управления: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХКАСКАДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СУЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

При использовании нечеткого регулятора с алгоритмом логического вывода Мамдани реализация процесса отработки задающего воздействия происходит с незначительной статической ошибкой. Возможным путем устранения этой ошибки является внедрение в такую систему управления двухкаскадного нечеткого модуля, использующего в своей основе алгоритмы вывода Мамдани и Сугено соответственно. Такой подход позволит за счет некоторого усложнения структурной реализации нечеткого регулятора согласовать параметры нечетких регуляторов, синтезированных для работы системы в зоне отработки сигнала до «номинальной

скорости» и «выше номинальной скорости», а также исключить различие диапазонов информационных входных сигналов. Внешний каскад формируется нечетким логическим регулятором с механизмом вывода Сугено первого порядка и реализуется как классификатор, оценивающий входную информацию и осуществляющий выбор соответствующего элемента вложенного каскада. В свою очередь, второй каскад состоит из набора простейших нечетких модулей с алгоритмом вывода Мамдани и формирует итоговое управляющее воздействие многокаскадного регулятора [9].

Имитационная модель двухкаскадной нечеткой системы управления электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости представлена на рис. 12.

В качестве интеллектуального модуля первого каскада будет выступать нечеткий регулятор switch1, функциональная схема которого представлена на рис. 13. Формализация входных данных нечеткого регулятора switch1 может быть представлена единственной входной лингвистической переменной input1 в блоке фазификации и двумя информационными выходами output1 и output2 в блоке дефазификации. Функционирование интеллектуального модуля switch1 осуществляется с применением нечеткого логического вывода Сугено [10].

Информационный вход input1, формализующий понятия первого входного сигнала нечеткого регулятора – сигнала ошибки, задан на области определения [0.47; 0.46] блока фазификации, в котором распределены две функции принадлежности нечетких переменных треугольной формы (рис. 14).

Информационные сигналы output1 и output2 описывают понятия первого и второго выходного воздействия интеллектуального модуля switch1 соответственно. С учетом выбранного механизма вывода в блоке дефазификации формируются две постоянные величины – 0 и 1.

Продукционные правила базы знаний нечеткого регулятора switch1 имеют следующий вид:

1. If «ошибка по скорости» is mf1, then Output1 = 1, Output2 = 0.
2. If «ошибка по скорости» is mf2, then Output1 = 0, Output2 = 1.

Наполнение внутреннего каскада может быть представлено набором типовых нечетких модулей с единственными информационными входом и выходом, которые будут соответствовать настройке системы электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием в режимах до номинальной и выше номинальной скорости соответственно. Настройка основных блоков таких модулей представлена выше и соответствует нечеткому логическому регулятору, показанному на рис. 7. Главное отличие модулей внутреннего каскада заключается в разности диапазонов регулирования, связанных с вариациями различных переменных, а именно напряжением в первой зоне и потоком сцеплением во второй [11].

В результате моделирования двухкаскадной нечеткой системы управления с двухзонным регулированием скорости были получены результаты моделирования (рис. 15 и 16), анализ которых позволяет говорить о том, что благодаря внедрению в систему двухкаскадного нечеткого регулятора удалось обеспечить качественный переходный процесс системы с отсутствующим перерегулированием [12].

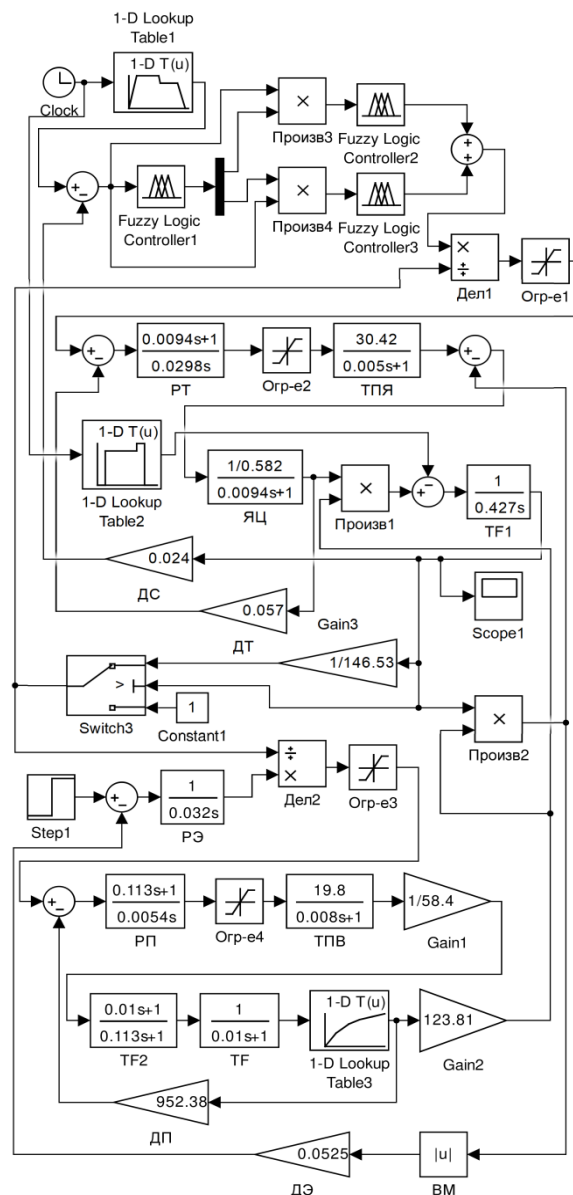


Рис. 12. Имитационная модель системы управления электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости с двухкаскадным нечетким логическим регулятором

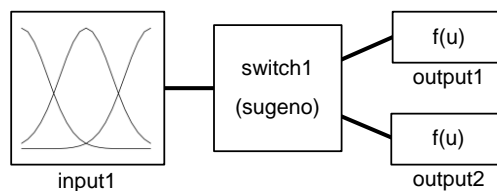


Рис. 13. Функциональная схема НЛР внешнего каскада

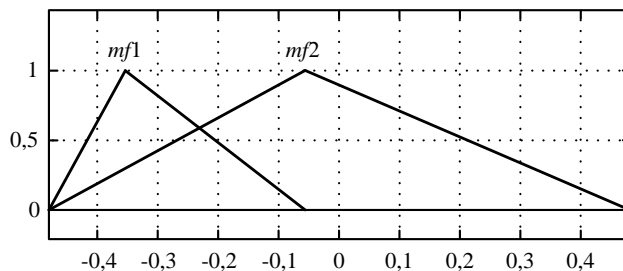


Рис. 14. Базовое терм-множество понятия «ошибка по скорости», формализованного лингвистической переменной

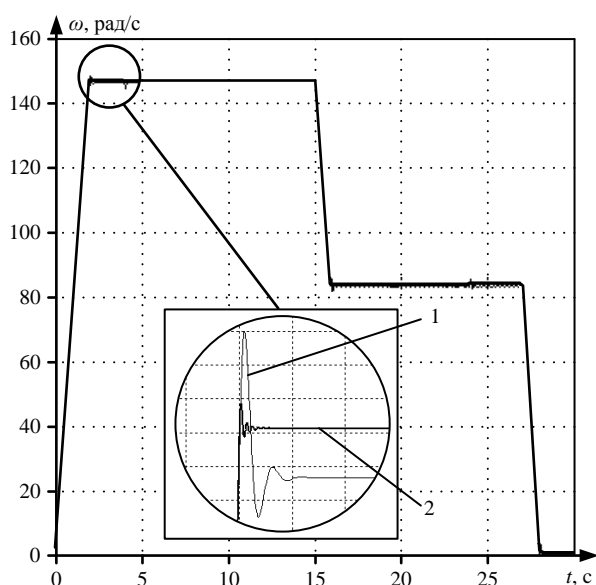


Рис. 15. Реакция классической системы и нечеткой системы управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим до «номинальной скорости» при отработке входного воздействия: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

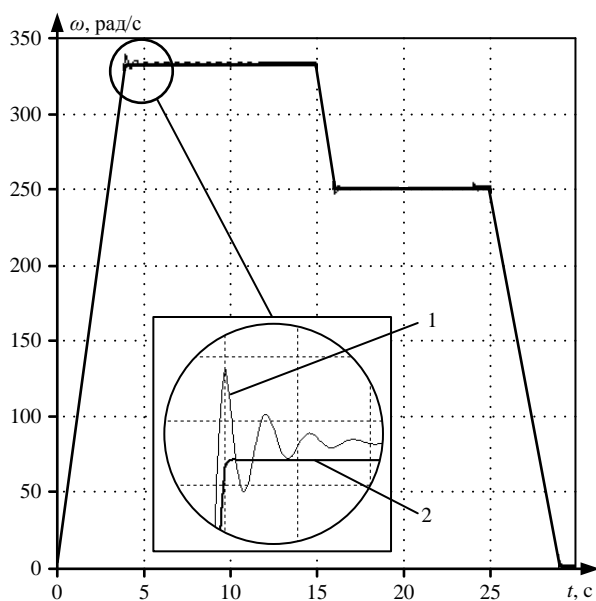


Рис. 16. Реакция классической и нечеткой систем управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим «выше номинальной скорости» при отработке входного воздействия: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования интеллектуальной системы управления с двухзонным регулированием скорости указывает на правомерность применения методов мягкого вычисления при синтезе такой имитационной модели. Предложенная методика позволяет повысить свойства универсализма развитого нечеткого регулятора путем увеличения числа простейших элементов вложенного каскада, при этом упрощает процедуры вывода, сокращает алгоритмическую сложность подобных регуляторов и увеличивает адаптивные свойства, а также повышает быстродействие системы в целом.

В результате анализа существующих подходов к реализации систем управления сложными техническими объектами предложенный подход позволил улучшить основные характеристики систем управления электроприводами постоянного тока с двухзонным регулированием скорости за счет применения развитой нечеткой системы. Данная проблема напрямую связана с повышением производительности и интенсивности производства промышленных установок, а также с улучшением их эффективности и качества выходного продукта. Применение классических подходов для реализации систем управления с двухзонным регулированием не позволяет им достичь потенциально высоких показателей. Возможным решением для улучшения качественных характеристик таких установок является применение управления, основанного на теории нечетких множеств.

Исследование проводится в рамках гранта №ВН010/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
2. Cherny S., Khrulkov V., Vasilchenko S. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 9111902. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902
3. Susdorf V.I., Cherniy S.P., Buzikayeva A.V. Optimization of Series Motor Drive Dynamics // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344
4. Savelyev D.O., Gudim A.S., Solovov D.B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements // International Science and Technology Conference "EastConf" (EastConf). 2019. 8725324. doi: 10.1109/Eastconf.2019.8725324
5. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.
6. Стельмашук С.В., Капустенко Д.В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. № 1(38). С. 28-40.
7. Болдырев В.В., Горькавый М.А. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 3(43). С. 9-18.
8. Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Купова А. В. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14, №2. С. 23-28.
9. Стельмашук С.В., Чернов А.Ю. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование // Электротехнические системы и комплексы. 2012. №20. С. 256-265.
10. Трусов Р.Е., Горькавый М.А. Повышение точности мяг-

ких вычислений в системе поддержки процессов ситуационной оценки // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. С. 488-491.

11. Mazandarani M, Pariz N, Kamyad A.V. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions // IEEE Transac-

tions on Fuzzy Systems. 2018. 26(1). Pp. 310-323. doi: 10.1109/TFUZZ.2017.2659731.

12. Савельев Д.О., Гудим А.С., Хрульков В.Н. Программный модуль нечеткого логического компенсатора нелинейных элементов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2017. С. 128-131.

Поступила в редакцию 18 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPROACH TO SIMULATION OF TWO-STAGE FUZZY DC DRIVE CONTROL SYSTEM WITH TWO-ZONE SPEED CONTROL

Sergej P. Cherniy

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, keapu@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8410-7985>

Vjacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

Alina V. Buzikayeva

Postgraduate student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, alina200954@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7181-6435>

Sergei I. Sukhorukov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, sukhorukov@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1522-3517>

The paper presents the simulation of an intelligent DC electric drive control system (SUEP) with two-zone speed control using the fuzzy sets theory. A developed fuzzy SUEP with two-zone speed control has been implemented. The results comparative analysis of modeling an intelligent control system and an electric drive system using classical approaches to adjusting regulators is presented, and the advantages and disadvantages of using soft computing in an intelligent control system for an AC electric drive are revealed. The dynamic characteristics of classical and intelligent control systems are investigated. The introduction of a multi-cascade fuzzy controller into intelligent control systems, where the external cascade of the fuzzy module is considered as an expert system that controls the nested cascade controllers, allows reducing the information load of the production knowledge base, the number of linguistic variables, and also reducing the algorithmic complexity in the fuzzification and defuzzification blocks. Algorithms and procedures used in multistage fuzzy controllers can be used as prediction modules in advanced automation objects, for example, in electric drive control systems with two-zone regulation, as well as similar technological processes used in the electric power industry, robotics and transport. This approach allows a fuzzy multi-stage control system to combine various structural solutions for setting up controllers, while obtaining qualitative characteristics of transient processes, and to expand the intellectual capabilities of fuzzy control systems by combining them structurally and functionally into multi-stage structures to solve the problems of regulating complex technological processes under condition -views of multi-criteria, multi-tasking and multi-coordinate.

Keywords: electric drive control system, two-zone regulation, fuzzy inference algorithms, fuzzy logic controller.

REFERENCES

1. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v Matlab, SymPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in Matlab, SymPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press, St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. (In Russian)
2. Cherny S., Khrulkov V., Vasilchenko S. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. IEEE, 2020, 9111902. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902
3. Susdorf V.I., Cherniy S.P., Buzikayeva A.V. Optimization of Series Motor Drive Dynamics. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344
4. Savelyev D.O., Gudim A.S., Solovov D.B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements. 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", IEEE, 2019, 8725324. doi: 10.1109/Eastonf.2019.8725324
5. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. *Upravlenie elektroprivodami: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Control of electric drives: a textbook for universities]. Leningrad, Energoizdat, 1982. 392 p. (In Russian)
6. Stelmashchuk S.V., Kapustenko D.V. Coordinated control of belt transportation with a modal regulator. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Proceedings of Komsomolsk-on-Amur state technical university], 2019, vol.1, no. 1(38), pp. 28-40. (In Russian)
7. Boldyrev V.V., Gorkavyi M.A. Development of an intelligent control module for an automated autonomous power supply system. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Proceedings of

- Komsomolsk-on-Amur state technical university], 2020, no. 3(43), pp. 9-18. (In Russian)
8. Soloviev V. A., Deryuzhkova N. E., Kupova A. V. Modeling of a static thyristor compensator in the power supply system of an arc steel-smelting furnace. *Vestnik YUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 23-28. (In Russian)
9. Stelmashchuk S.V., Chernov A.Yu. PID-control of automatic control system with maximum operating speed and restriction to overregulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2012, no. 20, pp. 256-265. (In Russian)
10. Trusov R.E., Gorkavyy M.A. Increasing the accuracy of soft computing in the support system for situational assessment processes. *Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy: materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Youth and Science: Actual Problems of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the II All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University Publ., 2019, pp. 488-491. (In Russian)
11. Mazandarani M, Pariz N, Kamyad A.V. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018. No. 26. Pp. 310-323. doi: 10.1109/TFUZZ.2017.2659731
12. Saveliev D.O., Gudim A.S., Khrulkov V.N. Software module of the fuzzy logical compensator of nonlinear elements. *Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Production technologies of the future: from creation to implementation: materials of the international scientific and practical conference], Komsomolsk-on-Amur, 2017, pp. 128-131. (In Russian)

Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С.П. Черный, В.А. Соловьев, А.В. Бузикаева, С.И. Сухоруков // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 2(55). С. 32-39. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-32-39](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-32-39)

Cherniy S.P., Solovyev V.A., Buzikaeva A.V., Sukhorukov S.I. Approach to Simulation of Two-Stage Fuzzy DC Drive Control System with Two-Zone Speed Control. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 32-39. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-32-39](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-32-39)