

Максимова Н. А., Черный С. П., Сухоруков С. И.
N. A. Maksimova, S. P. Cherny, S. I. Sukhorukov

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТЫХ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ
С АЛГОРИТМОМ ВЫВОДА МАМДАНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**FEATURES OF SIMULATION OF DEVELOPED FUZZY SYSTEMS WITH THE MAMDANI
OUTPUT ALGORITHM FOR CONTROLLING DC ELECTRIC DRIVES**

Максимова Надежда Александровна – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Nadezhda A. Maksimova – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Sergey P. Cherny – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Сухоруков Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sergei.svan@gmail.com.

Sergei I. Sukhorukov – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergei.svan@gmail.com.

Аннотация. В работе представлен многокаскадный нечёткий регулятор для управления электроприводом постоянного тока, ориентированный на использование в следящих системах. Структурное решение включает в себя четыре нечётких регулятора, один из которых находится во внешнем каскаде, выполняя функцию интеллектуального переключающего устройства, формирующего сложный закон управления, и использует алгоритм вывода Мамдани. Во внутреннем каскаде реализованы простейшие нечёткие модули, использующие алгоритмы вывода Мамдани или Сугено. Также был проведён сравнительный анализ моделей представленных многокаскадных систем управления, построенных с использованием различных подходов.

Summary. The paper presents a multi-stage fuzzy controller for controlling a DC electric drive, oriented to use in servo systems. The structural solution includes four fuzzy controllers, one of which is located in an external stage, performing the function of an intelligent switching device that forms a complex control law, and uses the Mamdani inference algorithm. In the internal cascade, the simplest fuzzy modules are implemented using the Mamdani or Sugeno inference algorithms. Besides, a comparative analysis of the models of the presented multistage control systems built using various approaches was carried out.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, системы слежения, нечёткая логика, нечёткие системы, многокаскадный нечёткий регулятор, алгоритм вывода Мамдани, алгоритм вывода Сугено.

Key words: DC electric drive, tracking systems, fuzzy logic, fuzzy systems, multi-stage fuzzy controller, Mamdani inference algorithm, Sugeno inference algorithm.

Введение

На сегодняшний день во многих сферах человеческой деятельности нашли своё применение системы, основу которых составляют принципы нечёткой логики, направленные на многозадачность, многокритериальность и многокоординатность. Использование методов на основе мягких вычислений позволяет получить качественный процесс, не уступающий по характеристикам системе с классическим методом управления, для которого характерны громоздкие вычислительные процедуры, т.к. повышение интеллектуальности системы допускает некоторые неточности в математическом описании объекта регулирования, что является положительным свойством нечётких систем, помимо увеличения быстродействия [7].

В связи с увеличением сложности математических моделей реальных систем и процессов управления повышается актуальность применения нечёткой логики в системах управления, основанная на желании увеличить их адекватность и учесть всё большее число различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений.

Отношение нечётких систем к классу интеллектуальных [3] позволяет решить ряд вопросов, связанных с совершенствованием управленческого процесса, в том числе улучшение характеристик следящих электроприводов.

В данной работе представлена следящая система, выполненная на базе нечёткого многокаскадного регулятора в контуре положения, с алгоритмом вывода Мамдани [5] во внешнем каскаде. В качестве объекта регулирования был взят электропривод постоянного тока с независимым возбуждением [6].

Синтез многокаскадного нечёткого регулятора с алгоритмом вывода Мамдани в первом и во втором каскаде

Модель системы регулирования положения исполнительного механизма электропривода с нечётким многокаскадным регулятором представлена на рис. 1.

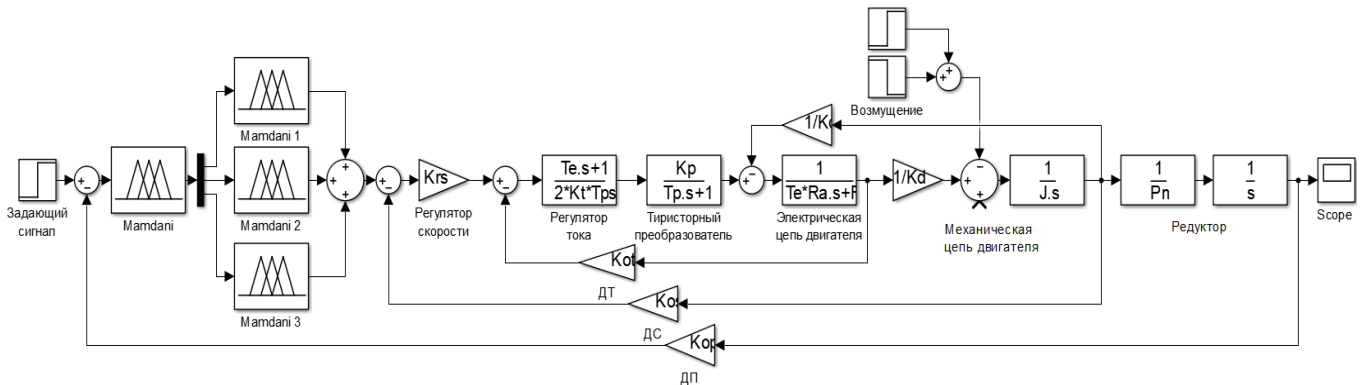


Рис. 1. Модель системы регулирования положения с нечётким многокаскадным регулятором

Данный многокаскадный регулятор представляет собой 1 вход и 3 выхода для первого каскада, а также вход и выход для каждого регулятора второго каскада. Внешний каскад на основе алгоритма вывода Мамдани вырабатывает управляющее воздействие, которое совместно с регуляторами внутреннего каскада обеспечивает требуемое качество динамических характеристик объекта регулирования.

Регулятор Mamdani (см. рис. 2) имеет одну входную лингвистическую переменную input1, которая формализует сигнал ошибки по положению для «больших», «средних» и «малых» перемещений. На выходе регулятора сигналы управления формализуются тремя лингвистическими переменными output1, output2 и output3. В основу данного регулятора положен алгоритм нечёткого логического вывода Мамдани [10]. Таким образом, данный регулятор выполняет интеллектуальную оценку поступающих на вход сигналов и на основе полученных данных вырабатывает управляющее воздействие на регуляторы второго каскада.

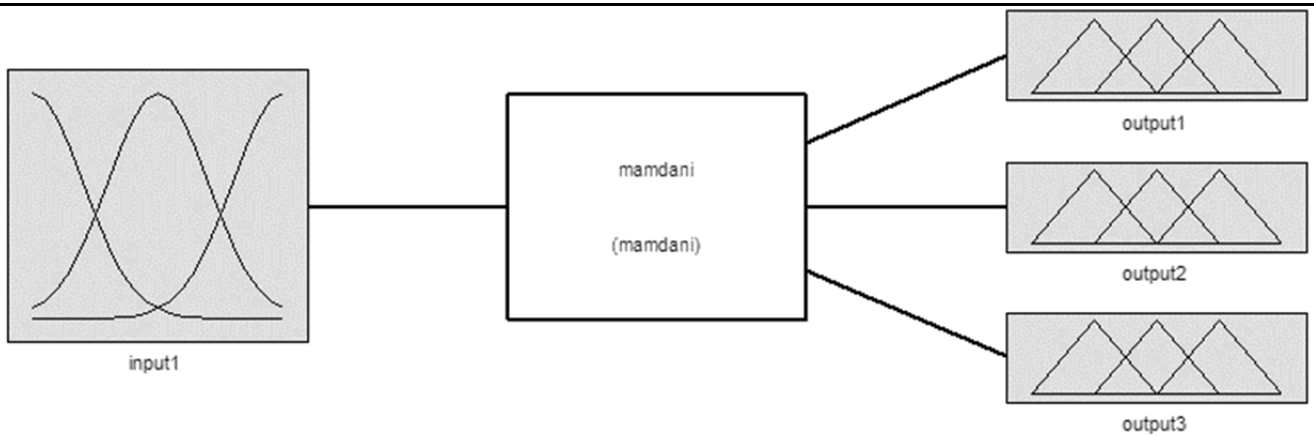


Рис. 2. Функциональная схема нечёткого регулятора Mamdani

Настройка диапазонов входных и выходных сигналов нечёткого регулятора осуществлялась симметрично [1].

Область определения лингвистической переменной input1, формализующей сигнал ошибки по положению, представляет собой диапазон -120...120, а базовое терм-множество (T) состоит из следующих элементов: $T = \{N, Z, P\}$ (см. табл. 1). Три функции принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной input1, как показано на рис. 3.

Таблица 1

Обозначение терм-множеств

Обозначение терм-множества	Англоязычная нотация	Русскоязычная нотация
N	Negative	Отрицательное
NM	Negative Middle	Отрицательное среднее
Z	Zero	Нуль, близкое к нулю
PM	Positive Middle	Положительное среднее
P	Positive	Положительное

Область определения лингвистической переменной, формализующей понятие сигнала ошибки по положению для «больших» перемещений, представляет собой диапазон -100...100, для «средних» перемещений – диапазон -10...10, для «малых» перемещений – диапазон -1...1.

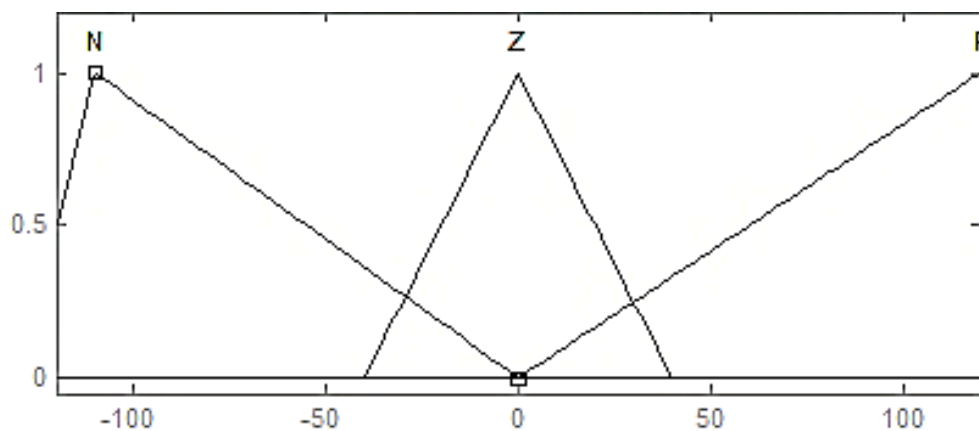


Рис. 3. Распределение нечётких термов лингвистической переменной input1

Пять функций принадлежности треугольного вида равномерно распределяются по диапазону областей определения [2] лингвистических переменных output1, output2 и output3.

Полная база знаний регулятора Mamdani имеет достаточно объёмную структуру [11]. Продукционная база знаний включает в себя правила вида:

1. Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть NM.
2. Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть PM.
3. Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть N.
4. Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть P.
5. Если «input1» есть P, то «output1» есть P, «output2» есть Z, «output3» есть Z.
6. Если «input1» есть P, то «output1» есть PM, «output2» есть Z, «output3» есть Z.
7. Если «input1» есть P, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть P.
8. Если «input1» есть P, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть PM.
9. Если «input1» есть N, то «output1» есть N, «output2» есть N, «output3» есть N.
10. Если «input1» есть N, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть NM.

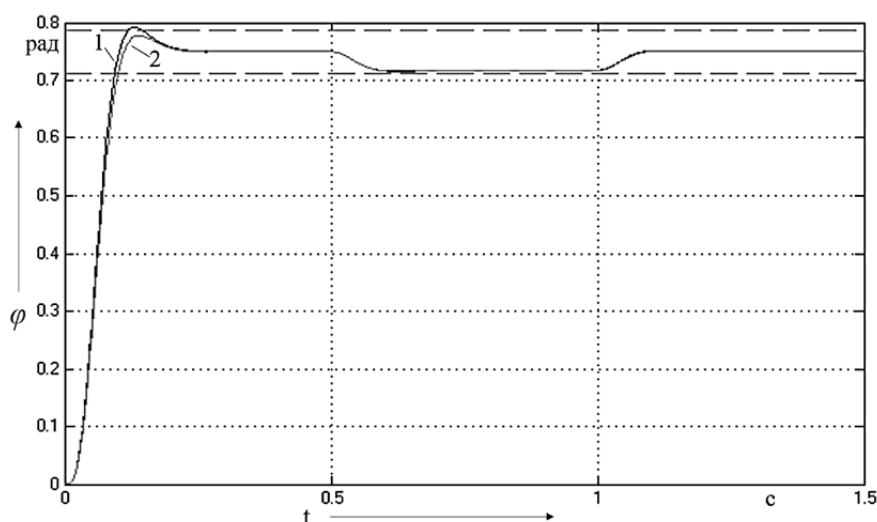
Простейший нечёткий модуль во втором каскаде включает в себя нечёткие регуляторы Mamdani 1, Mamdani 2 и Mamdani 3. Данные регуляторы имеют входные лингвистические переменные input1, формализующие сигнал ошибки по положению, и выходные лингвистические переменные output1, формализующие сигнал управляющего напряжения для контура скорости в случае «малых», «средних» и «больших» перемещений соответственно.

Настройки лингвистической переменной input1 регулятора Mamdani 1 (аналогично Mamdani 2 и Mamdani 3) идентичны настройкам лингвистической переменной output1 (аналогично output2 и output3 соответственно) регулятора Mamdani. Область определения лингвистической переменной output1 регулятора Mamdani 1 представляет собой диапазон $-660 \dots 660$, регулятора Mamdani 2 – диапазон $-70 \dots 70$, регулятора Mamdani 3 – диапазон $-6.8 \dots 6.8$.

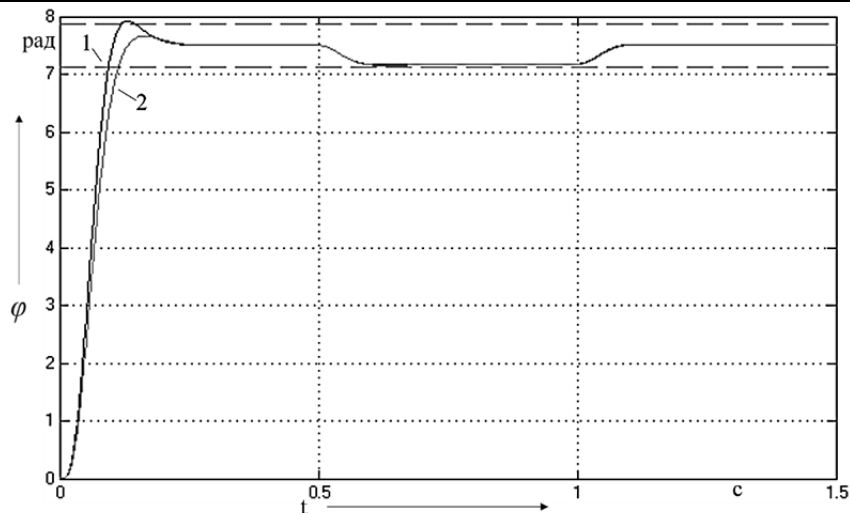
Нечёткая продукционная база знаний регуляторов второго каскада:

1. Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z.
2. Если «input1» есть N, то «output1» есть N.
3. Если «input1» есть NM, то «output1» есть NM.
4. Если «input1» есть P, то «output1» есть P.
5. Если «input1» есть PM, то «output1» есть PM.

Анализ системы с нечётким многокаскадным регулятором производится на основе полученных в результате моделирования графиков. На рис. 4–6 показана реакция систем с нечётким и с классическим регулятором на входной сигнал в малых пределах регулирования – 0.8 В, в средних – 8 В (номинальный сигнал) и в больших – 80 В, с набросом и съёмом нагрузки (0.5...1 с.).



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор
Рис. 4. Реакция систем на входное воздействие $U = 0.8$ В

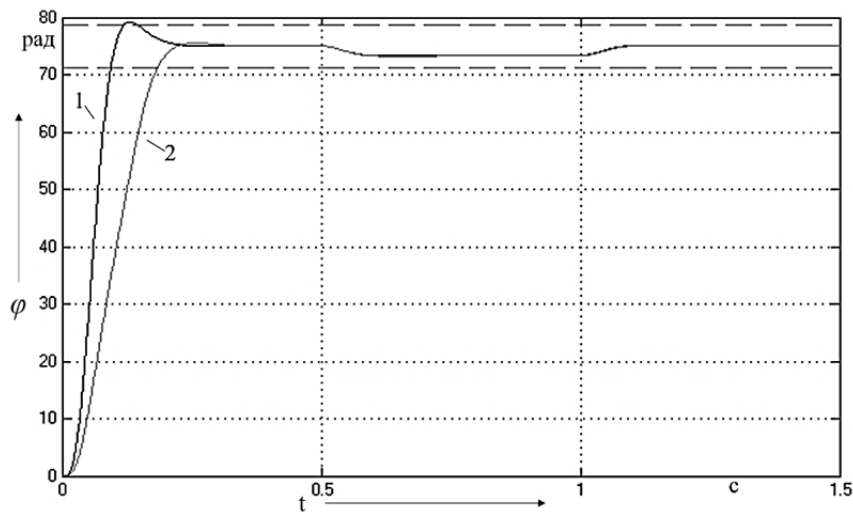


1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

Рис. 5. Реакция систем на входное воздействие $U = 8 \text{ В}$

Сводная таблица результатов моделирования (см. табл. 2) наглядно показывает отличие характеристик переходных процессов двух систем управления на базе классического и нечёткого регуляторов.

Многокаскадный регулятор показал лучшие характеристики переходных процессов по сравнению с классическим регулятором в пределах диапазона регулирования $-120 \dots 120$. Обработка возмущений нечётким регулятором происходит на уровне с классическим.



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

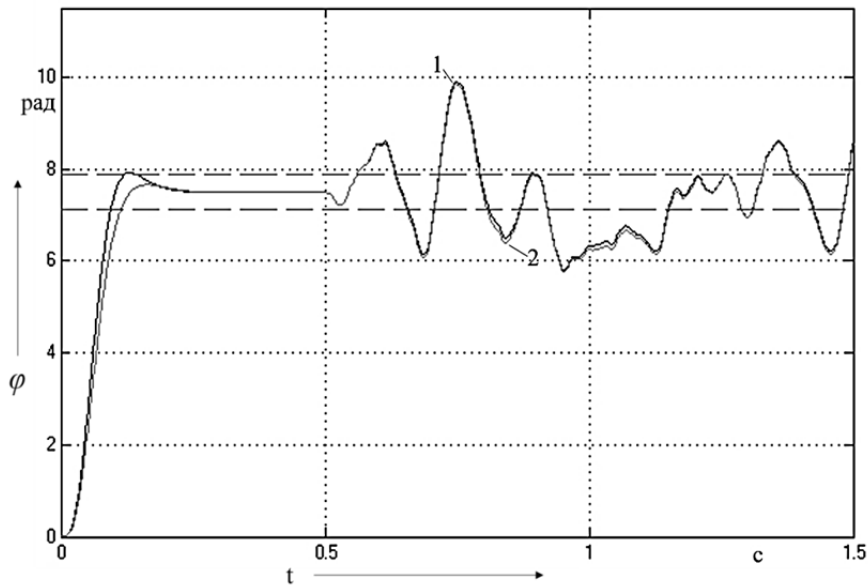
Рис. 6. Реакция систем на входное воздействие $U = 80 \text{ В}$

Таблица 2

Результаты моделирования

Входное воздействие	Время регулирования, с.		Перерегулирование, %	
	Классический регулятор	Нечёткий регулятор	Классический регулятор	Нечёткий регулятор
0.8 В	0.095	0.1	5.6	3.7
8 В	0.108	0.114	3.5	2.1
80 В	0.21	0.184	0.6	0.7

Реакция систем при подаче случайного сигнала большого номинала в качестве возмущения (0.5 с.) при задающем воздействии уровнем $U = 8$ В представлена на рис. 7.



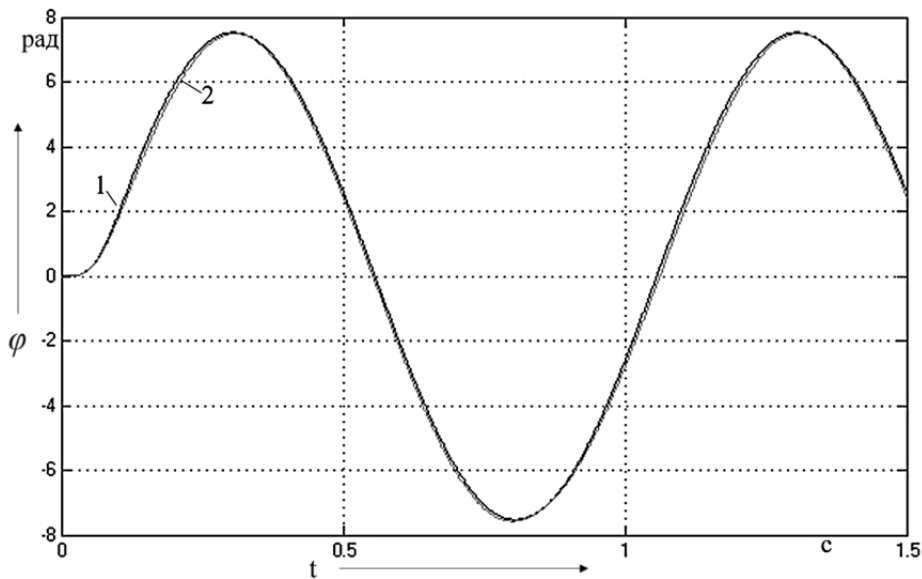
1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

Рис. 7. Реакция систем при подаче случайного сигнала большого номинала как возмущающего воздействия

Нечёткий регулятор практически так же обрабатывает большое возмущающее воздействие, как и классический, однако имеет расхождение графиков в максимальных значениях возмущений. Такая неточность регулируется количеством и расположением функций принадлежности во внешнем каскаде, что требует более детальной настройки.

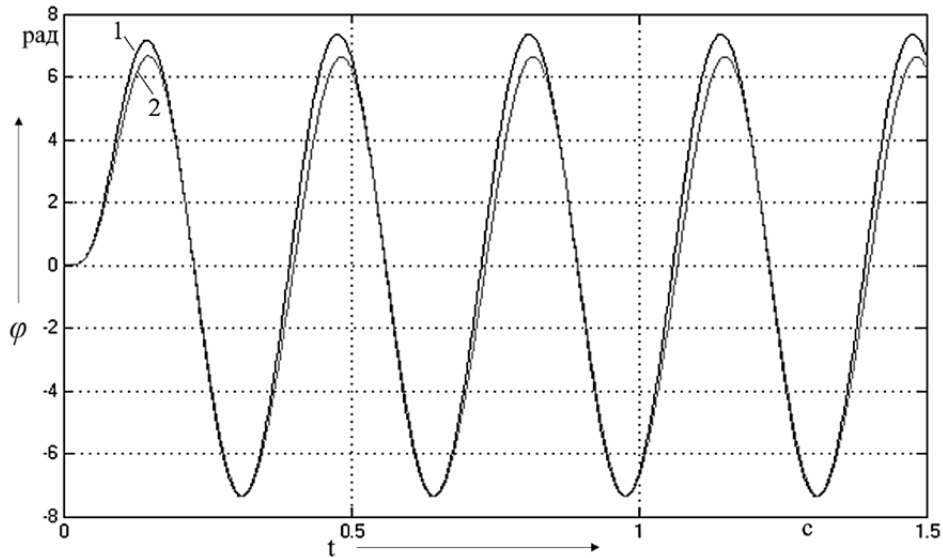
Реакция систем на синусоидальное входное воздействие с амплитудой 8 и частотой 2π рад/с представлена на рис. 8.

Реакция систем на изменение частоты в три раза (6π) представлена на рис. 9.



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

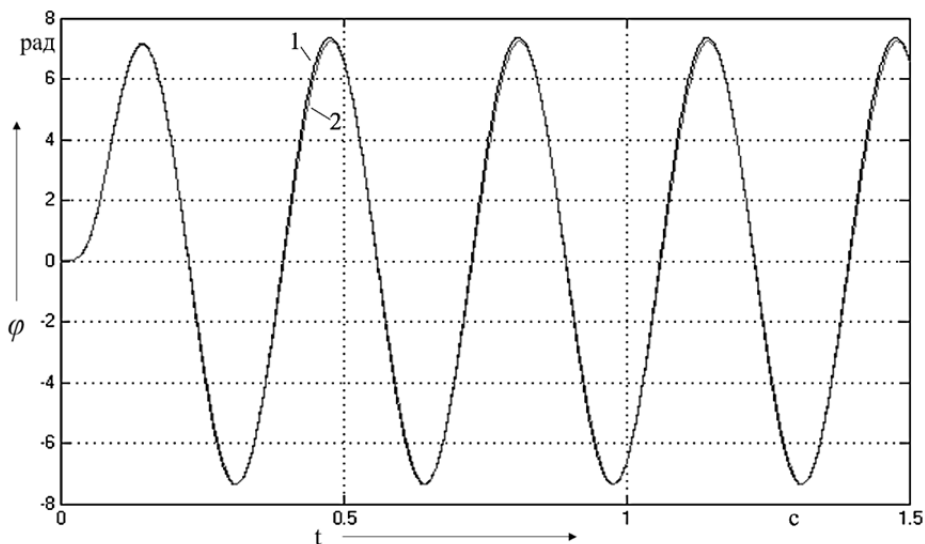
Рис. 8. Реакция систем на входное синусоидальное воздействие



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор
 Рис. 9. Реакция систем на входное воздействие с частотой 6π

Таким образом, при увеличении частоты в 3 раза синусоидальный сигнал нечёткого регулятора отстает по амплитуде в положительных значениях синусоиды. При дополнении базы знаний и добавления правила

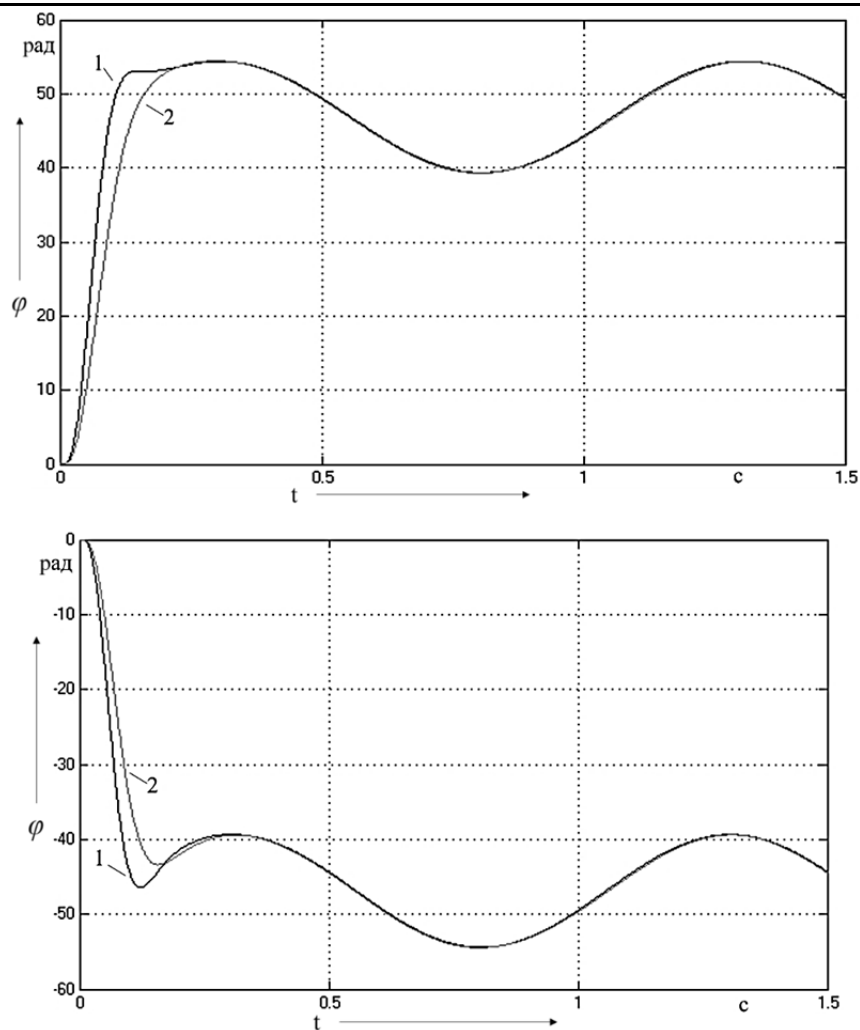
Если «input1» есть P, то «output1» есть P, «output2» есть P, «output3» есть P
 реакция нечёткой системы будет совпадать с классической (см. рис. 10).



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор
 Рис. 10. Реакция систем на входное воздействие с частотой 6π

Реакция систем на смещение синусоиды на величину 50 и -50 имеет вид графиков на рис. 11.

Нечёткая система, выходя на синусоиду, обрабатывает сигнал более плавно, без лишних колебаний, что наиболее удовлетворяет требованиям следящих систем.



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор
 Рис. 11. Реакция систем на входное синусоидальное воздействие со смещением вверх и со смещением вниз

Синтез многокаскадного нечёткого регулятора с алгоритмом вывода Мамдани в первом каскаде и алгоритмом вывода Сугено во втором каскаде

Определённое сочетание алгоритмов нечёткого вывода [9] может заметно влиять на выходные характеристики систем. В таком случае необходимо рассмотреть вариант настройки многокаскадного нечёткого регулятора, где во втором каскаде используется алгоритм вывода Сугено [4].

Модель системы регулирования положения исполнительного механизма электропривода с нечётким многокаскадным регулятором, использующим алгоритм вывода Сугено во втором каскаде, представлена на рис. 12.

При настройке многокаскадного нечёткого регулятора с алгоритмом вывода Сугено во втором каскаде меняются распределение функций принадлежности и содержание базы знаний. Таким образом, распределение функций принадлежности лингвистической переменной *input1* будет осуществляться так, как показано на рис. 13.

Настройки лингвистических переменных *output1*, *output2*, *output3* остаются неизменными, однако нечёткая продукционная база знаний регулятора Mamdani будет включать в себя шесть правил вида:

1. Если «*input1*» есть Z, то «*output1*» есть Z, «*output2*» есть Z, «*output3*» есть NM.
2. Если «*input1*» есть Z, то «*output1*» есть Z, «*output2*» есть Z, «*output3*» есть PM.
3. Если «*input1*» есть Z, то «*output1*» есть Z, «*output2*» есть Z, «*output3*» есть N.
4. Если «*input1*» есть Z, то «*output1*» есть Z, «*output2*» есть Z, «*output3*» есть P.

5. Если «input1» есть P, то «output1» есть PM, «output2» есть Z, «output3» есть Z.
6. Если «input1» есть N, то «output1» есть NM, «output2» есть NM, «output3» есть NM.

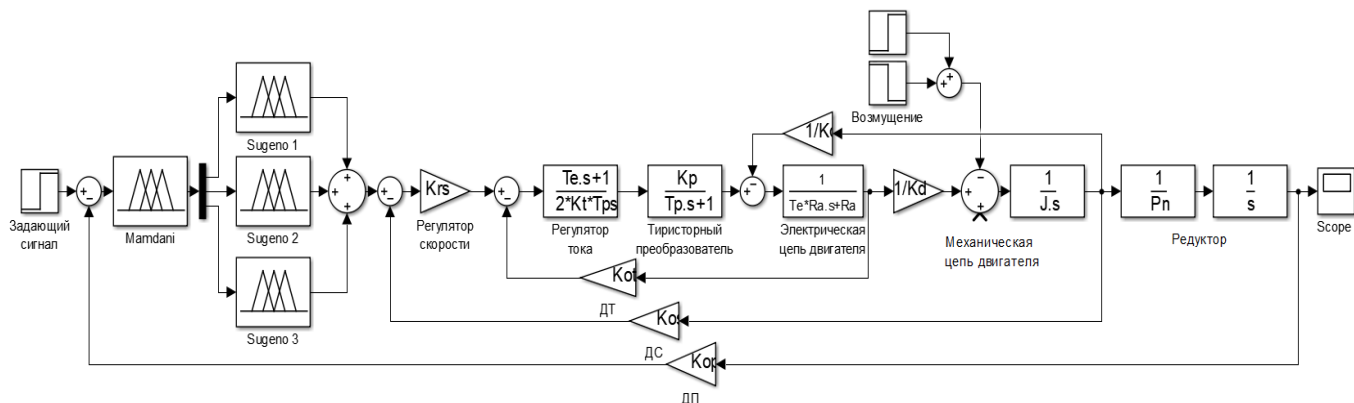


Рис. 12. Модель системы регулирования положения с нечетким многокаскадным регулятором с алгоритмом вывода Сугено во втором каскаде

Настройки лингвистической переменной input1 регулятора Sugeno 1, а впоследствии и Sugeno 2, Sugeno 3, идентичны настройкам лингвистической переменной output1, output2, output3 регулятора Mamdani (см. рис. 2).

Область определения лингвистической переменной output1 регулятора Sugeno 1 представляет собой набор констант: [-660; -300; 0; 300; 660]. Область определения лингвистической переменной output1 регулятора Sugeno 2 – [-66; -10; 0; 10; 66]; регулятора Sugeno 3 – [-6.8; 0.5; 0; -0.5; 6.8].

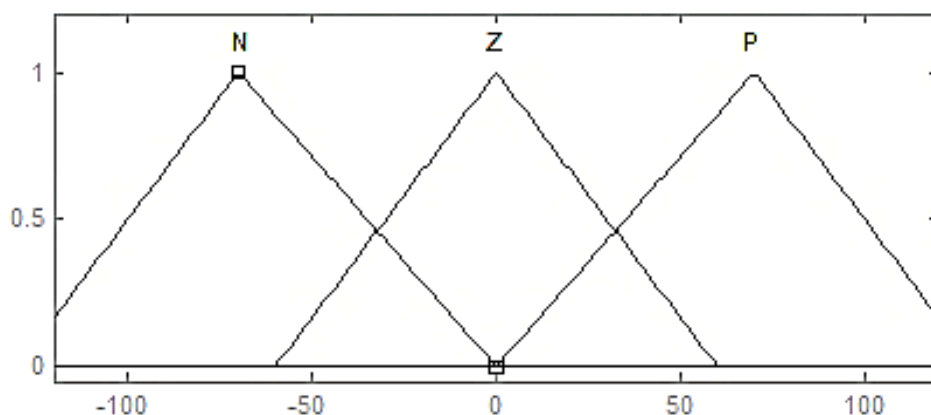


Рис. 13. Распределение нечётких термов лингвистической переменной input1

Нечёткая продукционная база знаний регулятора Sugeno 1 имеет вид:

1. Если «input1» есть Z, то «output1» = 0.
2. Если «input1» есть N, то «output1» = -660.
3. Если «input1» есть NM, то «output1» = -270.
4. Если «input1» есть P, то «output1» = 660.
5. Если «input1» есть PM, то «output1» = 270.

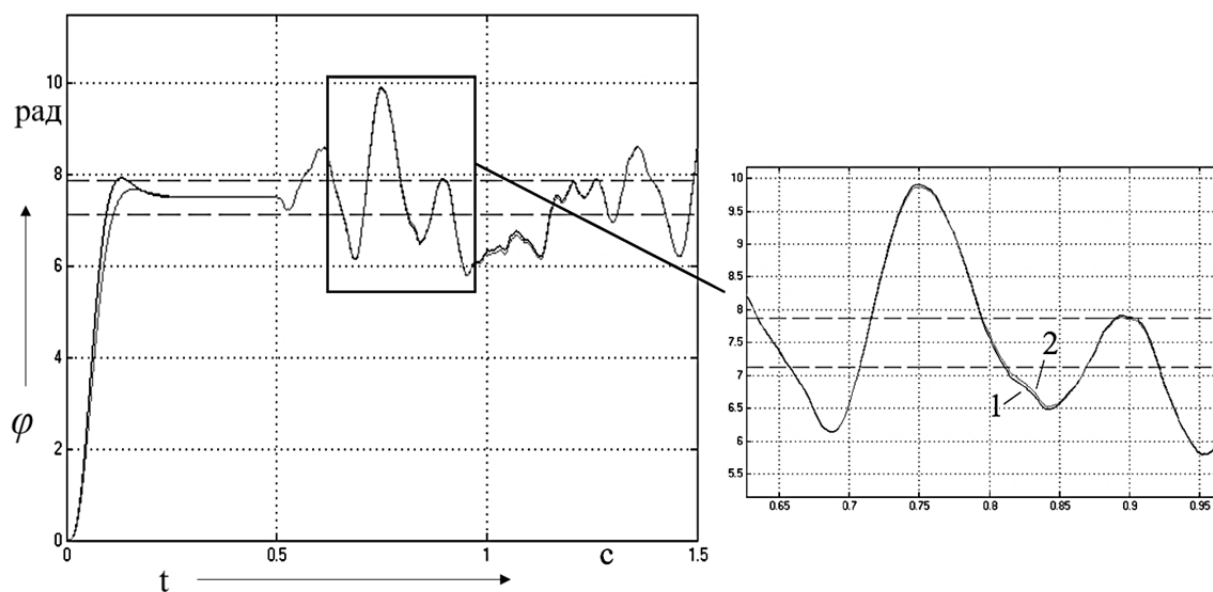
База знаний регуляторов Sugeno 2 и Sugeno 3 составляется аналогично базе знаний регулятора Sugeno 1.

Сводная таблица характеристик переходных процессов системы управления с новыми настройками многокаскадного нечёткого регулятора составляется на основе результатов моделирования (см. табл. 3).

Реакция систем при подаче случайного сигнала большого номинала в качестве возмущения (0.5 с.) при входном сигнале, равном 8 В, представлена на рис. 14.

Результаты моделирования

Входное воздействие	Время регулирования, с.		Перерегулирование, %	
	Классический регулятор	Нечёткий регулятор	Классический регулятор	Нечёткий регулятор
0.8 В	0.095	0.1	5.6	3.8
8 В	0.108	0.12	3.5	2.3
80 В	0.21	0.165	0.6	0.7



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

Рис. 14. Реакция систем при подаче случайного сигнала как возмущающего воздействия

Таким образом, нечёткий регулятор сглаживает возмущения в максимумах и минимумах, что является преимуществом перед классическим регулятором.

Реакция нечёткой системы на синусоидальное входное воздействие с амплитудой 8 и частотой 2π рад/с не отличается от предыдущей настройки. Реакция систем на изменение частоты в три раза (6π) представлена на рис. 15.

При добавлении правил

Если «input1» есть P, то «output1» есть P, «output2» есть P, «output3» есть P;

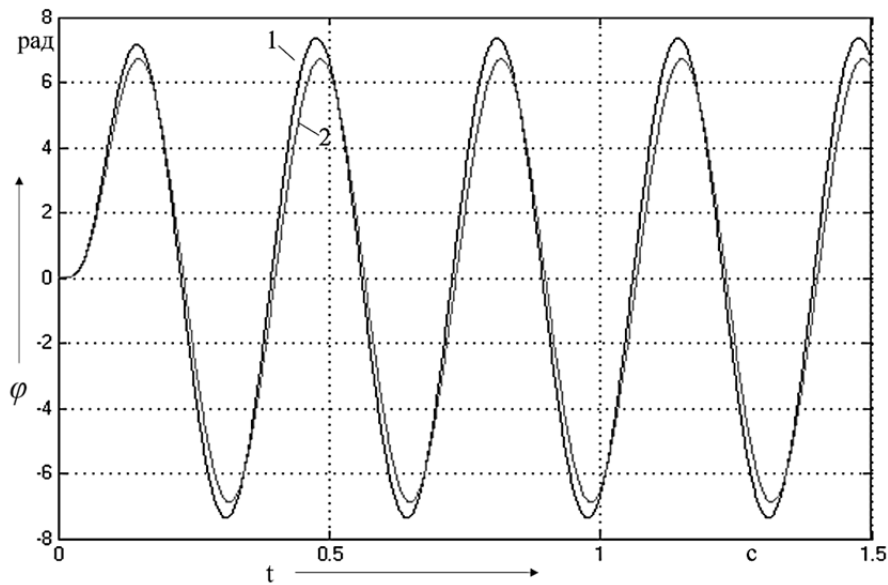
Если «input1» есть N, то «output1» есть N, «output2» есть N, «output3» есть N

реакция нечёткой системы будет совпадать с классической (см. рис. 16).

При смещении синусоидального сигнала на величину 50 и -50 реакция системы имеет вид графиков на рис. 17, что говорит о преимуществе нечётких регуляторов над классическими в обработке сигнала при смещении синусоиды.

Для наглядного представления качества переходного процесса систем классического и нечёткого регулирования на рис. 18-20 приведены графики, которые показывают работу трёх нечётких многокаскадных регуляторов на фоне классического при задающем воздействии уровнем $U = 0.8$ В, $U = 8$ В и $U = 80$ В.

Нечёткий регулятор Сугено-Мамдани, во внешнем каскаде которого используется регулятор на основе алгоритма вывода Сугено, а во внутреннем – регуляторы на основе алгоритма вывода Мамдани, был заимствован из предшествующих работ, развивающих данную тему систем нечёткого регулирования [8].

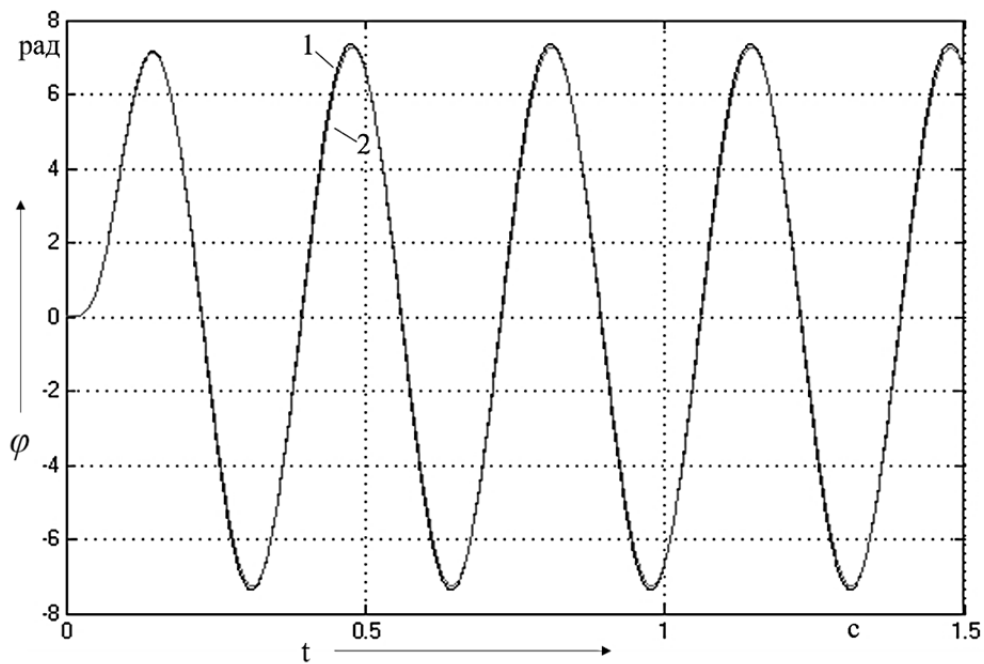


1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

Рис. 15. Реакция систем на входное воздействие с частотой 6π

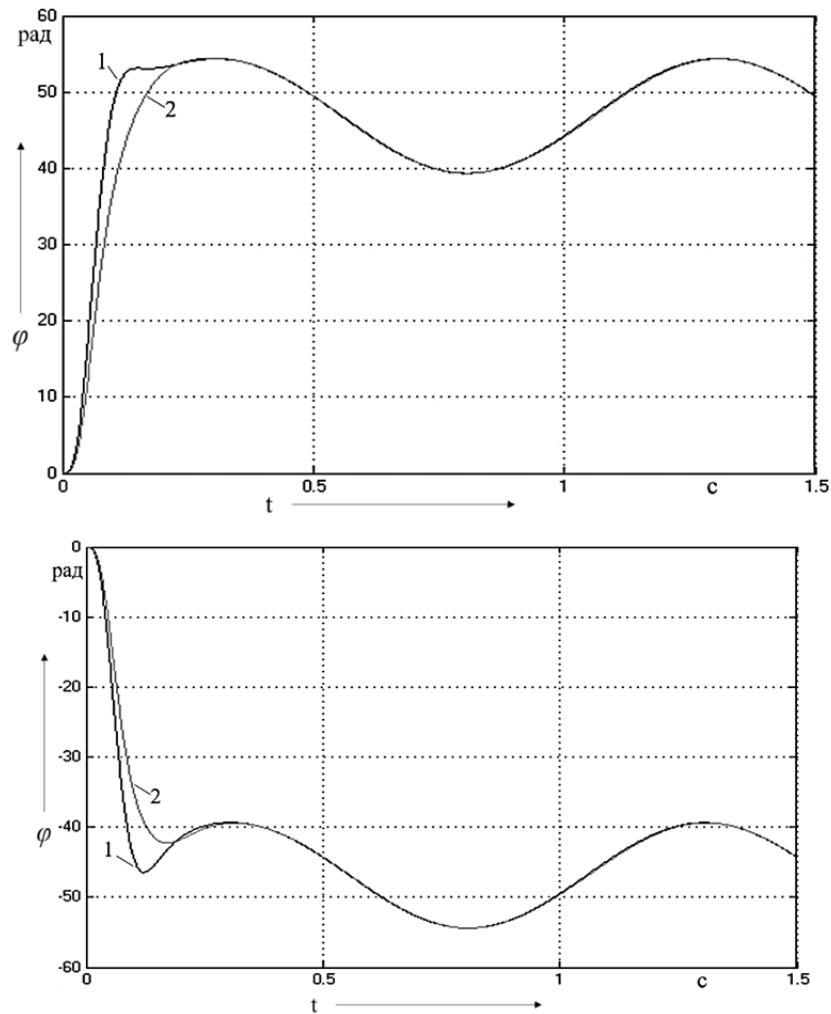
На рис. 18-20 представлен сравнительный анализ систем управления, использующих классический подход и различные сочетания алгоритмов нечёткого логического вывода: Мамдани-Сугено, Мамдани-Мамдани, Сугено-Мамдани.

Как видно из графиков, по показателям качества регулятор Мамдани-Сугено может сравниться с регулятором Мамдани-Мамдани, но первый лучше сглаживает колебания и при «больших» перемещениях обладает бóльшим быстродействием. Регулятор Сугено-Мамдани имеет низкое быстродействие по сравнению с вышеупомянутыми регуляторами и малое перерегулирование для «средних» перемещений, однако показывает высокую колебательность при «малых» и некорректную работу при «больших» перемещениях, что говорит о недостаточной настройке диапазона регулирования такого регулятора.

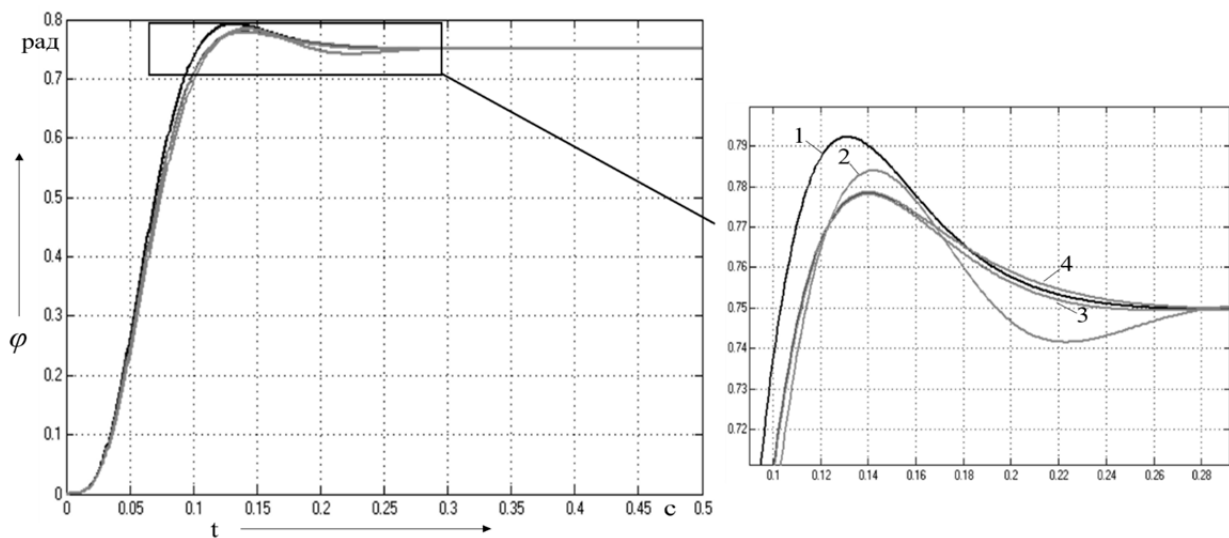


1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор

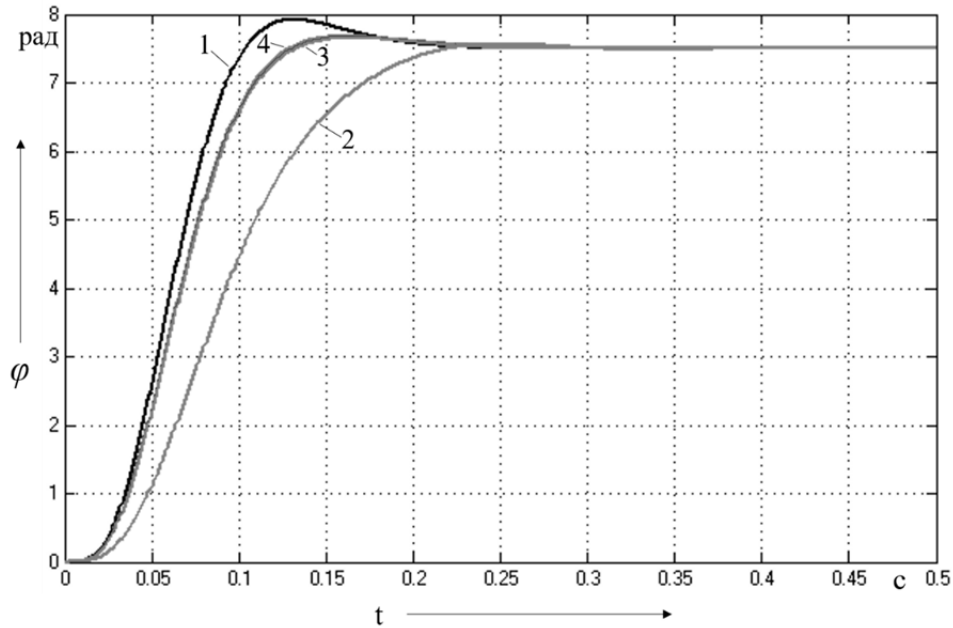
Рис. 16. Реакция систем на входное воздействие с частотой 6π



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор
 Рис. 17. Реакция систем на входное синусоидальное воздействие со смещением вверх и со смещением вниз

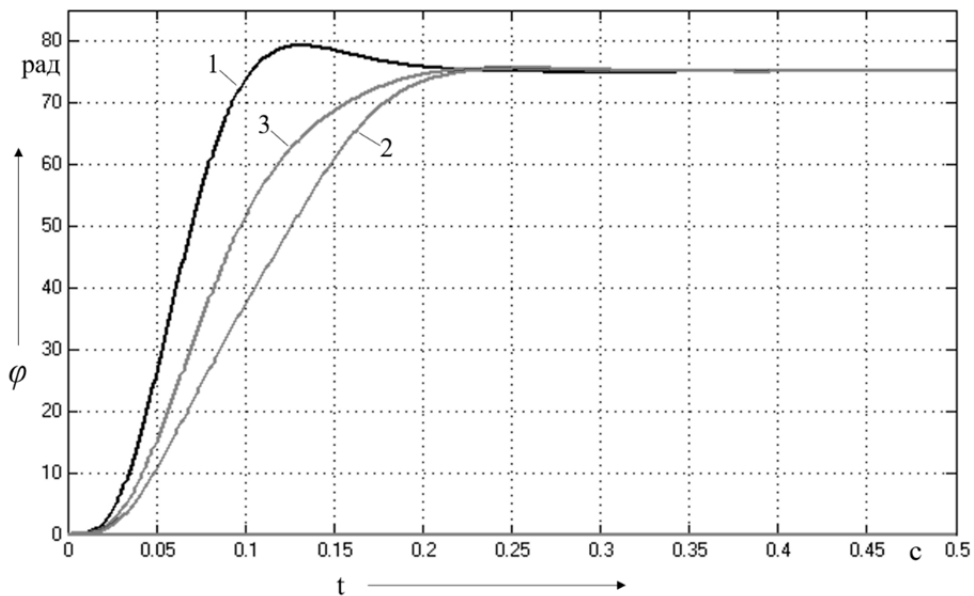


1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор Сугено-Мамдани;
 3 – нечёткий регулятор Мамдани-Мамдани; 4 – нечёткий регулятор Мамдани-Сугено
 Рис. 18. Реакция систем на входное воздействие $U = 0.8$ В



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор Сугено-Мамдани;
 3 – нечёткий регулятор Мамдани-Мамдани; 4 – нечёткий регулятор Мамдани-Сугено
 Рис. 19. Реакция систем на входное воздействие $U = 8 \text{ В}$

Таким образом, наилучшим переходным процессом, наиболее подходящим по характеристикам следящим системам, обладает система с нечётким многокаскадным регулятором Мамдани-Сугено.



1 – классический регулятор; 2 – нечёткий регулятор Мамдани-Мамдани;
 3 – нечеткий регулятор Мамдани-Сугено
 Рис. 20. Реакция систем на входное воздействие $U = 80 \text{ В}$

Заключение

Подводя итог, можем сделать вывод, что нечёткая логика является достойным альтернативным методом управления даже в случаях, когда информация об объектах управления не является точной. Такая технология также применима для совершенствования управления уже известными,

изученными объектами, что в итоге приводит к более широким возможностям оптимизации и упрощению эксплуатации за счёт более понятной для пользователя настройки. Внедрение нечёткой логики в системы управления позволяет снизить зависимость процесса синтеза регуляторов от степени изученности объекта управления, а также учитывать некоторые неопределённости и нелинейности в системе.

На основе результатов моделирования нечётких систем и анализа их показателей качества можно выделить несколько рекомендаций:

- регулятор разделяется на каскады для увеличения его мощности и упрощения базы знаний;
- для расширения диапазона регулирования входной величины системы необходимо увеличить число регуляторов во втором каскаде;
- показатели качества системы сильно зависят от распределения, вида функций принадлежности и базы правил во внешнем каскаде регулятора;
- уменьшение ширины терм-множества Z (нуль) во внешнем каскаде увеличивает быстродействие системы;
- расположение вершин терм-множеств P (положительное) и N (отрицательное) на диапазоне регулирования входного сигнала во внешнем каскаде влияет на перерегулирование;
- полная база знаний обуславливает правильную и адекватную работу нечёткого многокаскадного регулятора;
- определённое сочетание алгоритмов нечёткого вывода может заметно влиять на выходные характеристики систем.

Основным преимуществом многокаскадных нечётких регуляторов является гибкость настройки, а также возможность расширения диапазона регулирования за счёт увеличения числа нечётких регуляторов во внутреннем каскаде. Многокаскадность позволяет значительно упростить работу с переменными и с базой правил за счёт разделения диапазона регулируемой выходной величины (сигнала управления) регуляторами второго каскада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудим, А. С. Системы управления следящими электроприводами на базе нечёткой логики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Гудим Александр Сергеевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 24 с.
2. Черный, С. П. Особенности моделирования интеллектуальных регуляторов для систем электропривода переменного и постоянного тока / С. П. Черный, А. В. Бузикаева // Гагаринские чтения – 2019: сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2019. – 1345 с.
3. Cherny, S. P. Another approach to enhancement of fuzzy controller intellectual capabilities / S. P. Cherny, V. A. Solovyev // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Xplore Conference Publications. – 2017. – Pp. 1-4.
4. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 280 с.
5. Cherny, S. P. A model of multi-cascade fuzzy logic controller implemented using different variations of inference algorithms / S. P. Cherny, A. V. Buzikayeva, A. S. Gudim // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, fareastcon 2019. – 2019.
6. Susdorf, V. I. Microcontroller Control of Series Motor / V. I. Susdorf, M. T. Aung // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018.
7. Соловьев, В. А. Разработка и исследование методики синтеза нечёткого идентификатора по прямым показателям качества / В. А. Соловьев, В. С. Попова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 20-27.
8. Mitchell, S. A Cascading Fuzzy Logic Approach for Decision Making in Dynamic Applications: dissertation / Sophia M. Mitchell. – University of Cincinnati, 2016. – 126 p.
9. Малышев, Н. Г. Нечёткие модели для экспертных систем в САПР / Н. Г. Малышев, Л. С. Берштейн, А. В. Боженок. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
10. Mamdani E. H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7. – № 1. – P. 1-13.
11. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.