

УДК 658.012.011.56:658.512

В. А. Полетаев, И. С. Сыркин

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В каждом из каналов разрабатываемой системы управления присутствует регулятор, обеспечивающий поддержание выходной величины канала на заданном уровне.

Синтез регулятора сервопривода САУ процессом ЭЭО

Система управления сервоприводом содержит два регулятора – тока и положения. [1]

Обмотки электродвигателя, в которых требу-

$$u(t) = k_P \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right). \quad (1)$$

Передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = k_P + \frac{1}{T_{IP} p} + T_{DP} p. \quad (2)$$

Для настройки регулятора тока была создана схема, показанная на рис. 1. Для настройки регулятора тока применялся алгоритм градиентного спуска изменения параметров. Данный алгоритм

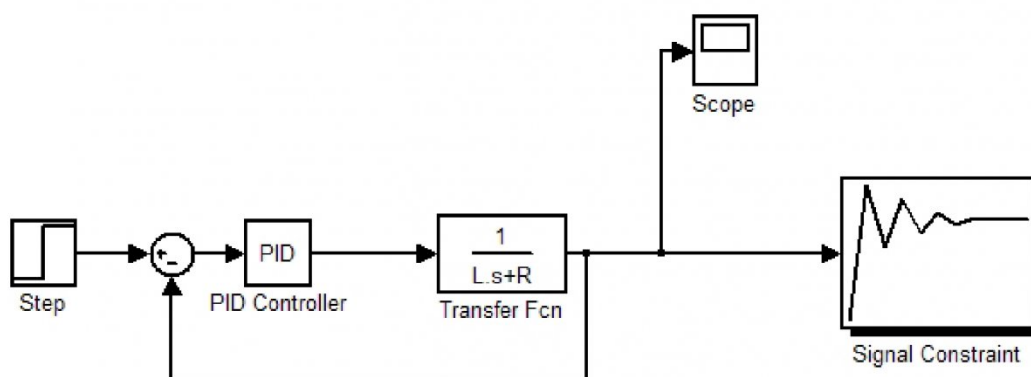


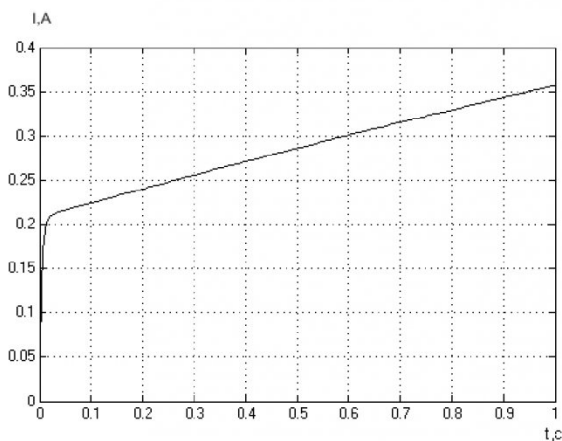
Рис. 1. Simulink модель для настройки регулятора тока

ется регулировать ток, описываются линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка, следовательно, для регулирования тока достаточно применения обычного ПИД-регулятора. Нелинейная зависимость усилия, создаваемого двигателем в зависимости от величины рабочего тока (рис. 1) требует создания нелинейного регулятора.

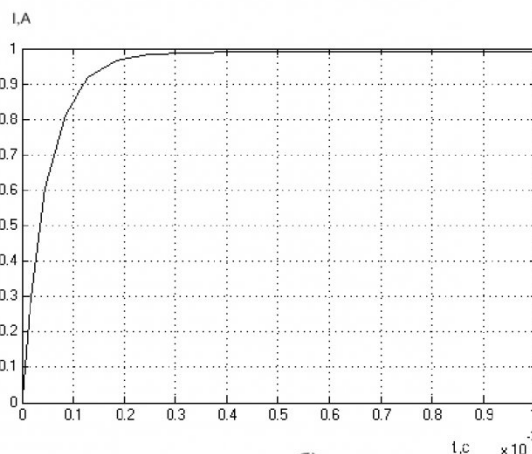
В качестве регулятора тока можно использовать обычный ПИД-регулятор, закон регулирования описывается уравнением: [2]

выполняется блоком "Signal Constrain" системы Simulink. Для этого были созданы переменные параметры для ПИД-контроллера, в блоке "Signal Constrain" были приняты желаемые границы переходного процесса изменения тока и задано единичное ступенчатое воздействие блоком "Step", представляющим собой генератор сигнала соответствующей формы. После начала работы оптимизации были найдены параметры ПИД-регулятора.

Параметры электрической части линейного



а)



б)

Рис. 2. Графики переходных процессов изменения тока в обмотках двигателя

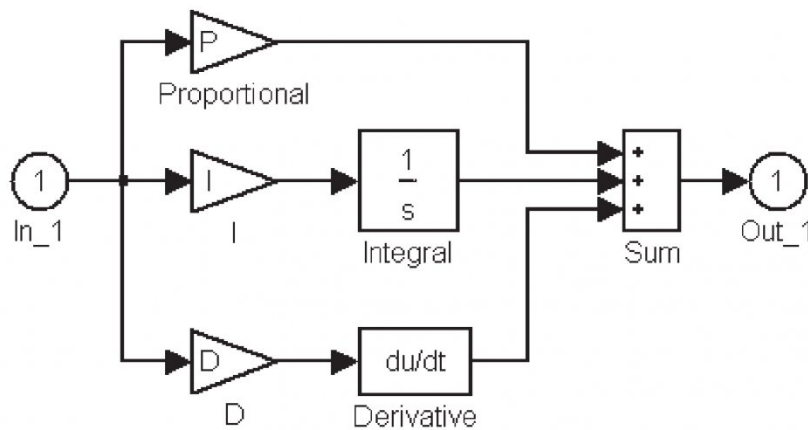


Рис. 3. Модель ПИД-регулятора

двигателя – индуктивность и сопротивление катушки составляют: $L = 20$ мГн; $R = 3,8$ Ом.

Результаты моделирования регулятора тока приведены на рис. 2. На рис. 2, а приведен график переходного процесса до автоматической настройки, при $K_p = 1$; $K_i = 1$, $K_d = 0$. На рис. 2, б приведен график переходного процесса после настройки. При этом параметры ПИД регулятора равны: $K_p = 403$; $K_i = 200$. После настройки параметров время регулирования составляет 0,004 с, перерегулирование отсутствует, переходный процесс аperiodический. Полученное время регулирования позволит изменять величину тока в обмотках 250 раз в секунду, что дает возможность 250 раз в секунду изменять положение якоря двигателя. Такая скорость изменения положения электродов друг относительно друга позволит проводить обработку в зоне оптимального зазора, обеспечивающего максимальную производительность. Аperiodический переходный процесс изменения тока позволяет устранить негативные явления, возникающие в катушках, связанных с появлением противо-ЭДС. Можно считать, что

регулятор тока настроен.

В качестве регулятора положения сервопривода можно использовать обычный ПИД-регулятор, как наиболее распространенный. [3]

В обычном регуляторе коэффициент передачи регулятора k_p и постоянные времени T_i , T_d не зависят от величины отклонения выходной переменной от желаемого значения [1].

ПИД-регулятор входит в библиотеку стандартных моделей пакета Simulink. Его модель представлена на рис. 3.

Для того, чтобы регулятор обеспечивал требуемые от него задачи – поддерживал выходную величину на заданном уровне и обеспечивал желаемый переходный процесс, необходимо подобрать его параметры. Подбор параметров регуляторов называют настройкой. В пакете MATLAB настройка регулятором может проводиться при помощи блока "Signal Constrain" системы Simulink. Данный блок реализует несколько алгоритмов оптимизации параметров. В данной работе был использован алгоритм градиентного спуска. После расчета параметров регулятора переходный про-

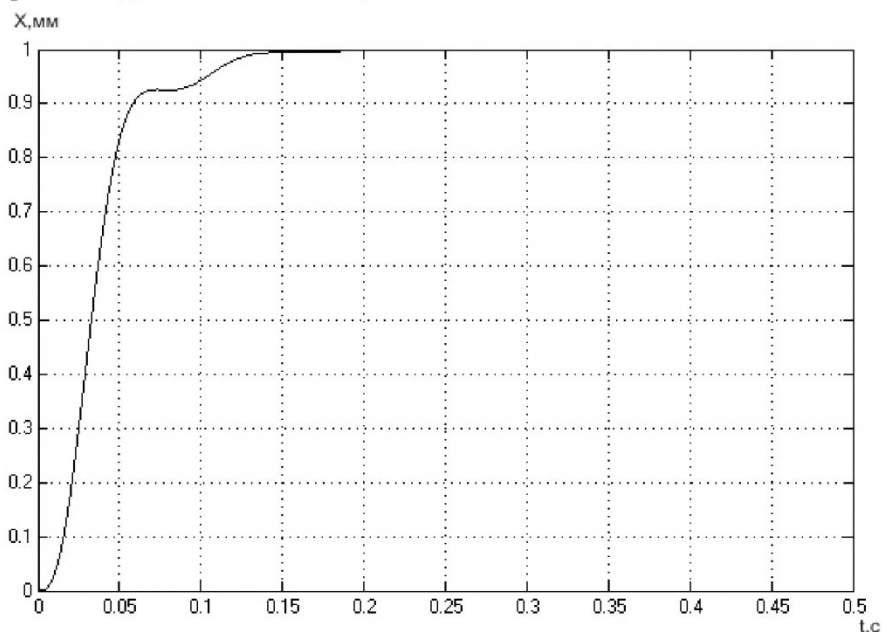


Рис. 4. График переходного процесса изменения координаты ЛД

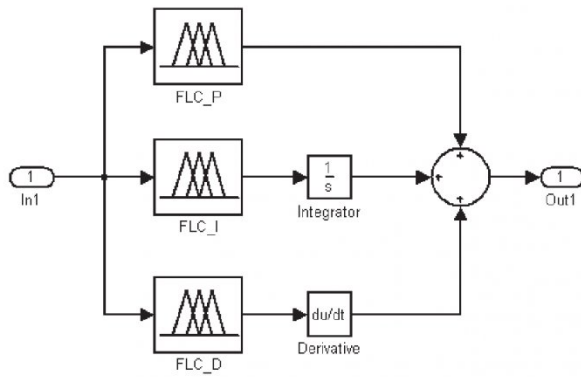


Рис. 5. Модель нечеткого ПИД-регулятора

цесс изменения положения якоря двигателя от единичного импульсного воздействия приобрел форму, показанную на рис. 4. Видно, что процесс похож на периодический, а это отрицательно влияет на динамические показатели сервопривода – возникают лишние перегрузки. Для устранения этого недостатка требуется усовершенствовать регулятор положения, установленный в сервоприводе.

Для изменения показателей качества регулирования было предложено внести в (1) изменения таким образом, чтобы закон регулирования принял вид (3). Этот закон отличается от закона, описанного (1) тем, что коэффициент усиления коэффициенты, находящиеся в интегрирующей и дифференцирующей частях закона зависят от величины ошибки рассогласования сигналов. Данное изменение позволит для каждого значения ошибки построить свой закон расчета выходного значения регулятора.

$$u(t) = k_p(\varepsilon(t)) \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_I(\varepsilon(t))} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_D(\varepsilon(t)) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Настройка такого регулятора требует определения трех функций: $k_p(\varepsilon)$, $T_I(\varepsilon)$ и $T_D(\varepsilon)$. Изначально закон изменения этих функций неизвестен, поэтому требуется выбрать способ автоматизированного построения функций, аппроксимирующих определенный закон. Одним из таких способов

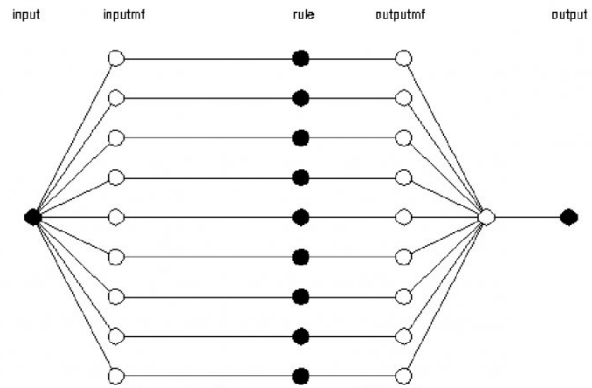


Рис. 6. Структура ANFIS сети

является применение адаптивных сетей нечеткого вывода (ANFIS). Пример использования ANFIS в ПИД-регуляторе приведен на рис. 5.

Первоначальный этап замены четкого ПИД-регулятора нечетким заключается в настройке усилительных элементов регулятора (ANFIS сетей) для работы в качестве линейных усилителей. В том случае, если нечеткий ПИД-регулятор покажет такие же показатели качества регулирования, что и классический ПИД-регулятор, описанный (1), будет доказана возможность использования нечеткого регулятора.

Для решения задачи создания усилителя с переменным коэффициентом усиления была создана сеть ANFIS, состоящая из одной входной переменной, описанной 9 нечеткими множествами, 9 правил принятия решений и одной выходной переменной. [1] Структура этой сети приведена на рис. 6.

Алгоритм обучения нечеткого ПИД-регулятора

Основная задача, стоящая перед разработчиками регуляторов – их настройка, т.е. расчет параметров. Правильно настроенный регулятор обеспечивает выполнение предъявляемых к нему требований. В случае нечеткого регулятора его настройка заключается в определении параметров отдельных блоков ANFIS. Блоки ANFIS на-

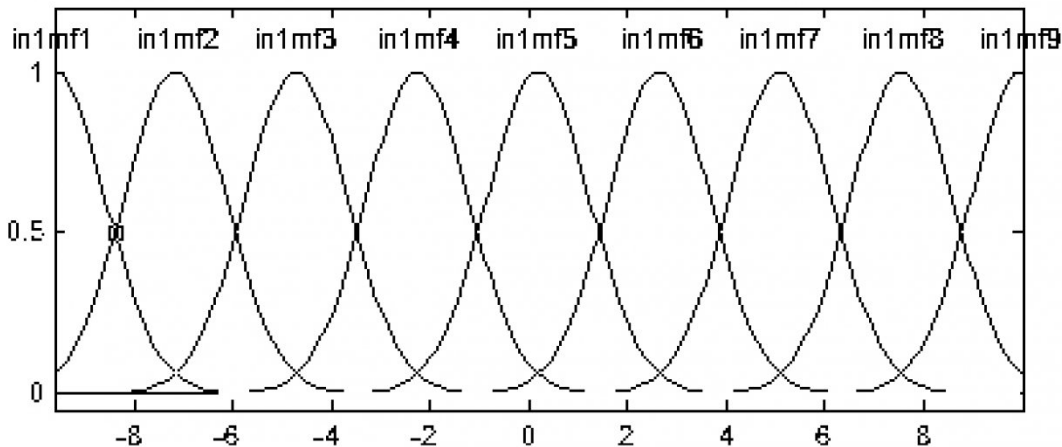


Рис. 7. Входная переменная сети в канале интегратора до обучения

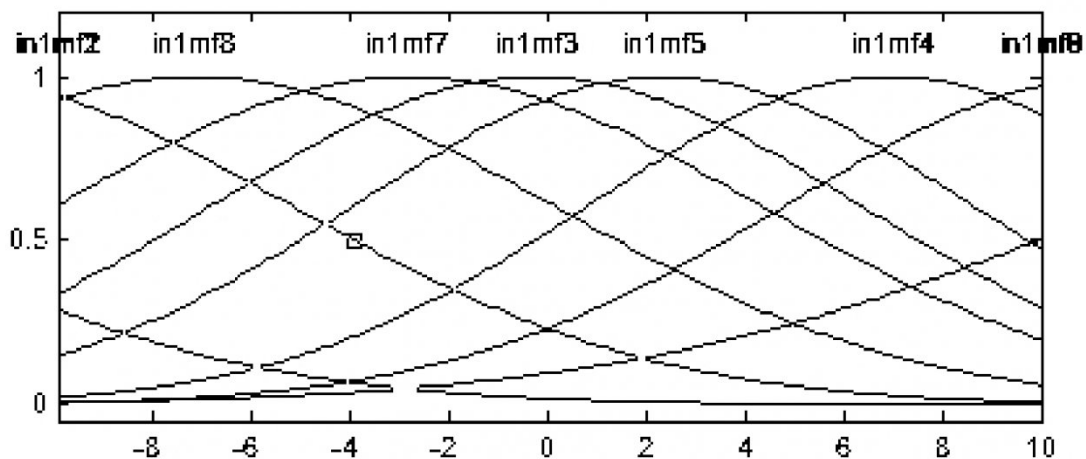


Рис. 8. Входная переменная сети в канале интегратора после предварительного обучения

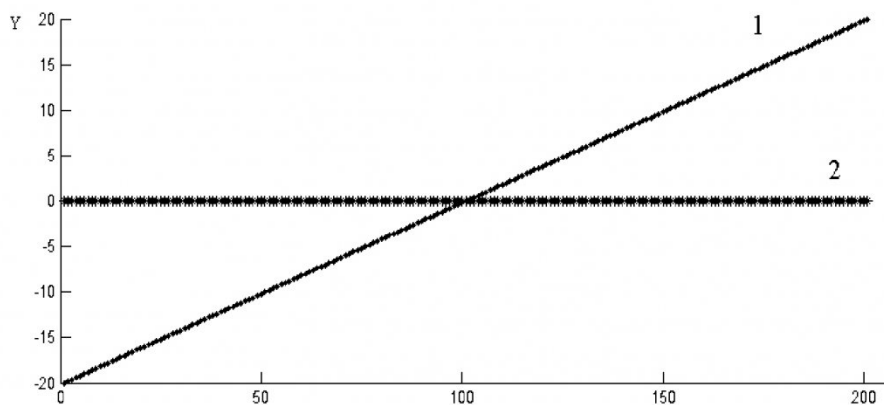


Рис. 9. Результат тестирования сети до обучения:
1 – тренировочная выборка; 2 – результат работы сети

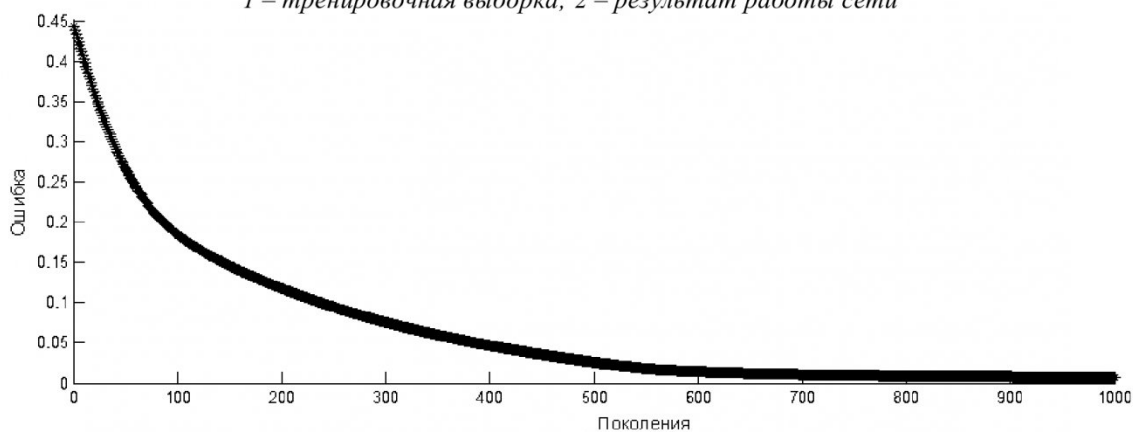


Рис. 10. Ошибка обучения

страиваются с использованием алгоритма обратного распространения ошибки, применяемого при обучении нейронных сетей.

Предварительная настройка нечеткого регулятора заключается в имитации работы классического ПИД-регулятора, когда коэффициенты уравнения (1) не зависят от величины ошибки.

До обучения сети вид функций принадлежности входной переменной приведен на рис. 7. Для обучения ANFIS можно использовать алгоритм

обратного распространения ошибки, применяемый для обучения нейронных сетей. Этот алгоритм требует создания т.н. обучающей выборки – набора пар входных и выходных значений, которые описывают аппроксимируемую функцию. Для обучения сети была составлена обучающая выборка из 200 пар "вход-выход". Обучение проводилось с помощью встроенных функций MATLAB на протяжении 300 итераций. В результате обучения функции принадлежности входной перемен-

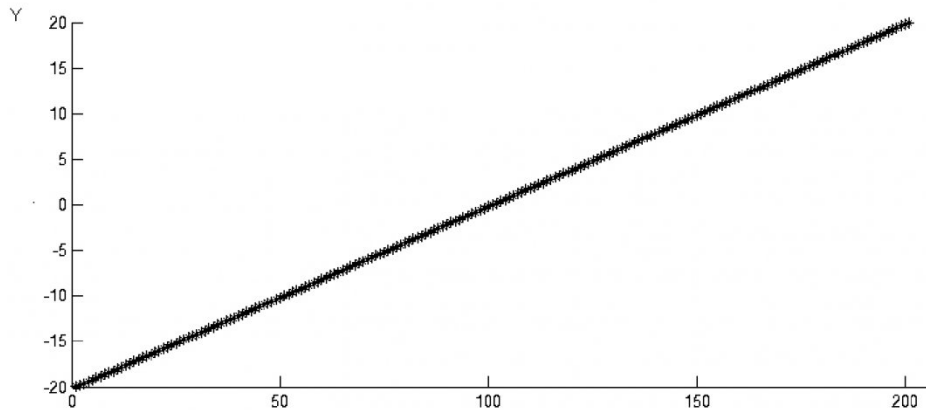


Рис. 11. Результат тестирования сети после обучения

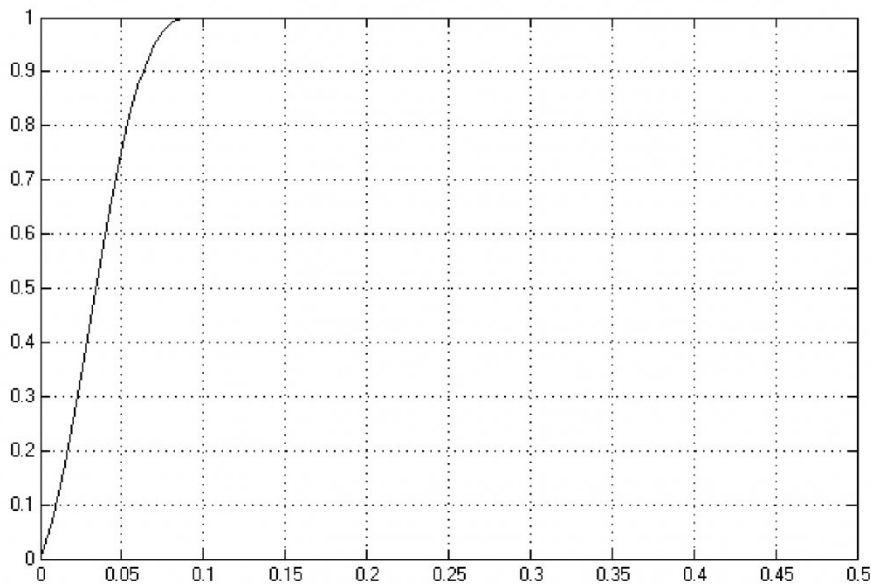


Рис. 12. График переходного процесса после основного обучения

ной приняли вид, показанный на рис. 8.

Пример обучения ANFIS для работы в качестве усилителя с коэффициентом усиления 2. Создана обучающая выборка в среде MATLAB, объем выборки – 40 элементов. Как было упомянуто выше, сеть ANFIS состоит из 9 входных переменных, вид функций принадлежности – гауссиан. [1]

Перед обучением было проведено тестирование сети – подача на вход значений из тестирующей выборки, которая отличается от обучающей только увеличенным количеством элементов – 200. Результат тестирования сети до обучения приведен на рис. 9. Среднеквадратичная ошибка составила 11,6. В ходе процесса обучения с использованием обучающей выборки ошибка обучения уменьшалась. График зависимости ошибки обучения от номера поколения приведен на рис. 10. После 1000 поколений обучения ошибка составляет 0,007. Результат тестирования после обучения приведен на рис. 11. Среднеквадратичная ошибка составляет 0,0064.

Результат обучения ANFIS подтверждает возможность работы этой системы в качестве ап-

проксиматора функций.

После предварительного обучения нейро-нечеткий регулятор положения сервопривода работал аналогично четкому регулятору и график переходного процесса изменения координаты от единичного ступенчатого воздействия был аналогичен рис. 4. Полученный результат доказывает возможность применения нейро-нечетких регуляторов для управления реальным процессом. Как уже было сказано, переходный процесс, показанный на рис. 4, обладает рядом недостатков.

Дальнейшая настройка нечеткого ПИД-регулятора производится при его работе. Для этого проводится моделирование работы системы с подачей на вход единичного ступенчатого воздействия. Для изменения параметров регулятора требуется сохранить данные, подаваемые на входы и получаемые с выходов блоков ANFIS. Эти данные используются для подготовки обучающих выборок.

Для улучшения показателей качества регулирования необходимо изменить обучить нечеткие элементы ПИД-регулятора.

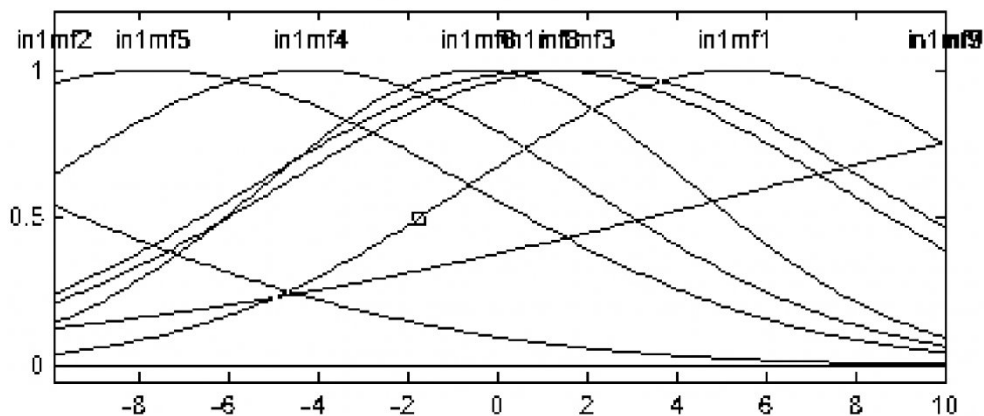


Рис. 13. Входная переменная сети в канале интегратора после основного обучения

Алгоритм обучения выглядит следующим образом.

1. Провести моделирование перемещения (построить график переходного процесса).
2. Оценить показатели качества регулирования.
3. Построить обучающие выборки для каждого из каналов регулятора (усилительного, интегрального и дифференциального).
4. Провести обучение ANFIS сетей.
5. Повторить, начиная с первого пункта до тех пор, пока показатели качества регулирования не будут улучшены (сократится время регулирования, избавится от колебательных процессов).

Обучение каждого из блоков ANFIS выполняется после каждого цикла моделирования системы. В результате обучения происходит последовательное приближение отклика системы к идеальному – без перерегулирования и с бесконечным быстродействием.

Результатом обучения нейро-нечеткого ПИД регулятора стало улучшение показателей качества регулирования. В ходе исследований был получен переходный процесс (рис. 12). Входная переменная сети в канале интегратора после обучения приведена на рис. 13. Анализ данных графиков показал, что полученный переходный процесс

носит аperiodический характер без перерегулирования, и время регулирования составляет 0,8 с, точность, обеспечиваемая данным регулятором составила 0,00015 мм. Эти данные позволяют утверждать, что разработанный регулятор положения сервопривода обеспечивает предъявляемые к нему требования

Алгоритм обучения нечеткого контроллера процесса обработки

Алгоритм обучения контроллера процесса обработки аналогичен алгоритму обучения нечеткого ПИД-регулятора. В его основе лежит анализ записи информации о состоянии входов и выходов реального процесса.

Обучающие выборки строятся на основе записанных данных значений входных переменных (δ_x , τ_j , I_{max}) и выходных переменных процесса (μ_p , μ_x , μ_k). Основой анализа служит расчет приращения выходных параметров от приращения входных параметров процесса [2].

Результатом внедрения разработанных алгоритмов обучения стало улучшение показателей качества регулирования разрабатываемых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модель процесса электроэрозионной обработки / В. А. Полетаев, И. С. Сыркин // Обработка металлов, 2005. – № 2. – С. 24-28.
2. Полетаев В. А. Управление процессом электроэрозионной обработки: монография / В. А. Полетаев, И. С. Сыркин; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2008. – 232 с.
3. Грон Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
4. Кениг В., Барц Е. Системы для оптимизации процессов при электроэрозионной обработке // Труды международного симпозиума по электрическим методам обработки: ISEM-4. – Братислава, 1974. – С. 152-157.

□ Авторы статьи:

Полетаев
Вадим Алексеевич
– докт. техн. наук, проф.,
зав. каф. "Информационные и автоматизированные производственные системы"

Сыркин
Илья Сергеевич
– ассистент каф. "Информационные и автоматизированные производственные системы"
Тел. 58-08-11