

Система управления шаговыми двигателями дорожного принтера на базе нечетких нейронных продукционных сетей

Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, К.С. Кравцов, Н.А. Ткаченко, И.Б. Оленев

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: Рассмотрена задача управления шаговыми двигателями дорожного принтера с использованием метода нейро-нечеткого управления. Описан алгоритм разработки интеллектуальной системы управления шаговыми двигателями. Получена обучающая выборка по данным переменных, определенных в результате моделирования системы автоматического управления с непрерывным пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором. Обучение адаптивной нейро-нечеткой системы вывода гибридным методом выполнено с использованием программы MATLAB. Построены переходные характеристики системы управления с непрерывным и нейро-нечетким ПИД-регуляторами. Определены прямые показатели качества рассмотренных систем управления шаговыми двигателями, а также выполнен анализ этих результатов. Использование нейро-нечеткого-ПИД управления шаговыми двигателями позволило получить качественный переходный процесс, подтвержденный в результате вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: дорожный принтер, шаговый двигатель, дорожный принтер, шаговый двигатель, передаточная функция, адаптивная нейро-нечеткая система вывода.

Для повышения уровня безопасности автомобильных дорог важно при проектировании их обеспечить соответствие требованиям разметки и устанавливаемых на дороге знаков, светофоров и других средств. Согласно ГОСТ Р 51256-2011 «Разметка дорожная», дорожные знаки выполняются прямой и фигурной формы. Механизация и автоматизация этих процессов обеспечивается дорожными принтерами (ДП). В работе [1] приведено описание модели ДП, предложена модель автоматизированного ДП с системой управления шаговыми двигателями (ШД).

Главным требованием к рабочему процессу ШД ДП является обеспечение вращения ротора на заданный угол, который зависит от режима управления. Режим полного шага двигателя обеспечивает передачу большего электромагнитного момента, при этом частота шага ротора ШД ограничивается качеством функционирования применяемой системы автоматического управления (САУ). Критерием точности регулирования

частоты шага ротора может служить переходная характеристика (ПХ), имеющая монотонный характер. Для регулирования шага двигателя могут применяться типовые регуляторы. В работах [2, 3] рассмотрены методы параметрической настройки пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов, подходы к анализу управляющих систем по переходным и частотным характеристикам.

В процессе работы шаговых двигателей может появляться вибрация, резонанс, высокая температура, снижение точности позиционирования [4, 5]. Эти процессы влияют на целостность двигателя с точки зрения эффективности и точного позиционирования. Для снижения влияния колебательного процесса шагового двигателя требуется создание высокоэффективной САУ. В работе [1] рассмотрена задача синтеза ПИД-регулятора системы управления шаговыми двигателями дорожного принтера, математическая модель которых представлена передаточной функцией [6]. Качество управления оценивалось по переходной характеристике САУ приводом по прямым показателям качества – времени регулирования, перерегулированию, колебательности.

Для создания высокоэффективной САУ шаговыми двигателями ДП предложено применить технологии искусственного интеллекта. Для исследования принят вариант нейро-нечеткой (НН) системы вывода (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System – ANFIS) [7, 8], обладающей достоинствами искусственных нейронных сетей способных обучаться, и нечеткого вывода, позволяющего учесть экспертные знания [9, 10, 11].

Целью работы является построение интеллектуальной системы управления шаговыми двигателями дорожного принтера на базе нейро-нечеткого регулятора.

Объект исследования – рабочий процесс шаговых двигателей дорожного принтера.

Предмет исследования – переходные характеристики системы управления шаговыми двигателями.

Описание объекта исследования и результаты синтеза системы управления с непрерывным ПИД-регулятором приведено в работе [1].

Рассматривается класс линейных стационарных САУ, рис. 1.

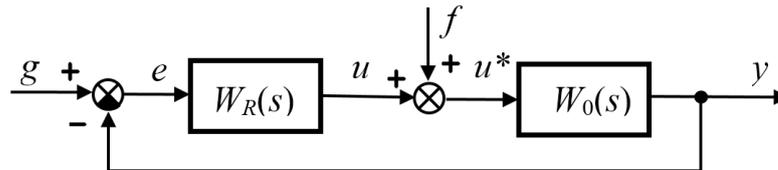


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления

Здесь: u и y – регулируемый вход и регулируемый выход объекта соответственно; g – уставка; e – ошибка: $e = g - y$; f – возмущение; $W_R(s)$ и $W_0(s)$ – ПФ регулятора и объекта управления соответственно.

Считаем, что порядок модели объекта равен n_0 , и его ПФ является правильной рациональной дробью:

$$W_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)}, \quad (1)$$

где $B_0(s)$ и $A_0(s)$ – полиномы следующего вида:

$$A_0(s) = s^{n_0} + \sum_{i=0}^{n_0-1} a_i^0 s^i, \quad B_0(s) = \sum_{j=0}^{m_0} b_j^0 s^j, \quad (2)$$

$m_0 < n_0$; a_i^0, b_j^0 – постоянные коэффициенты, причем $b_0^0 \neq 0$.

Сделано допущение, что объект вполне управляем и наблюдаем, так что дробь (2) несократимая.

Модель ШД описывается передаточной функцией [6]:

$$W_p(s) = \frac{3,839}{0,004 \cdot s^2 + 0,34 \cdot s + 1}. \quad (3)$$

Предложено использовать для разработки интеллектуальной САУ ШД нейро-нечеткие системы. Они могут быть реализованы для систем типа «один вход – один выход» (single inputs - single outputs – SISO) и «много входов – один выход» (many inputs - single outputs – MISO).

Обучаемый НН ПИД-регулятор должен обладать способностью приобретать знания о поведении объекта управления и системы, и на их базе вырабатывать управляющий сигнал, при котором ошибка регулирования не должна превышать заданного значения. Этим требованиям удовлетворяют НН система типа ANFIS [7, 8]. Она представляет собой структуру пятислойной НС прямого действия с нечеткой моделью вывода типа Такаги - Сугено (ТС) [8].

Структура НН системы включает три входные и одну выходную переменные, заданные, для сравнительного анализа, треугольной и гауссовой функциями принадлежностями (ФП).

Алгоритм синтеза модели НН ПИД-регулятора.

Этап 1. Построение математической модели объекта управления. Параметрический синтез непрерывного ПИД-регулятора САУ ШД.

Этап 2. Моделирование САУ и проверка ее на устойчивость. Формирование обучающей выборки для модели НН ПИД-регулятора моделированием САУ с непрерывным ПИД-регулятором и определением данных временных переменных: ошибка управления; интеграл ошибки; производная ошибки; сигнал управления.

Этап 3. Определение структуры нейро-нечеткого регулятора.

Этап 4. Запуск ANFIS-редактора (команда `anfisedit`) в программе MATLAB. Загрузка обучающей выборки.

Этап 5. Создание исходной системы нечеткого логического вывода в области генерирования.

Этап 6. Обучение НН системы.

Этап 7. Тестирование НН системы. Проверка.

Этап 8. Сохранение НН системы под названием *.fis.

Этап 9. Моделирование САУ с непрерывным ПИД- и нейро-нечетким ПИД-регуляторами. Анализ прямых показателей качества переходных характеристик.

В работе [1] получена ПФ объекта управления и определены параметры непрерывного ПИД-регулятора. В среде программы MATLAB/Simulink построена имитационная модель САУ с непрерывным и НН ПИД-регуляторами, рис. 2.

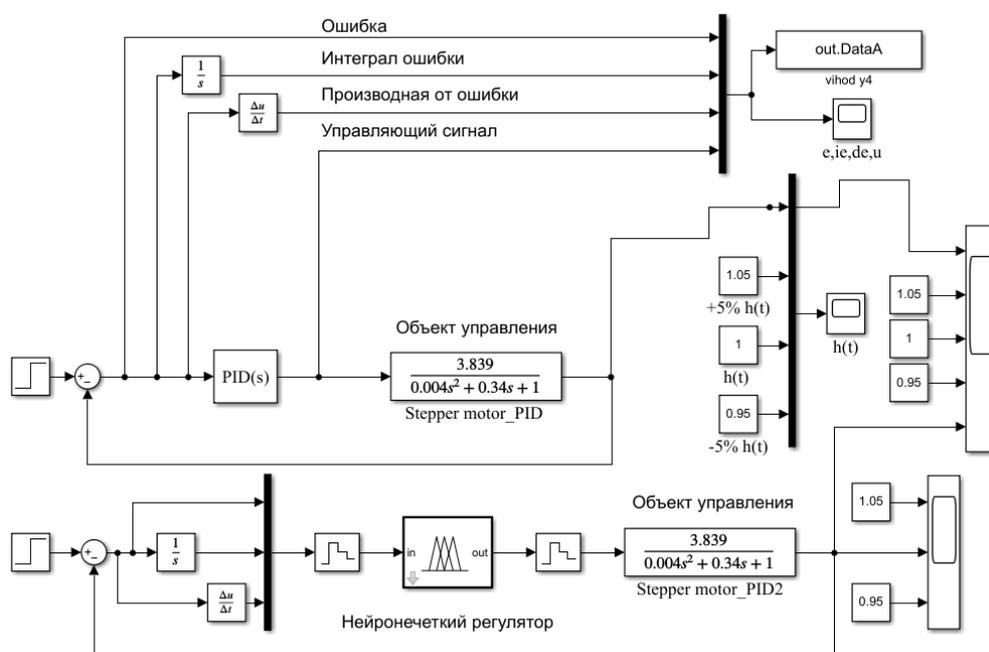


Рис. 2. Имитационная модель системы автоматического управления с непрерывным и нейро-нечетким регуляторами

Выполнено численное моделирование работы непрерывной САУ в программной среде MATLAB/Simulink. Получен набор данных переменных, который разделен на обучающую и тестовую выборку в пропорции 70% и 30% соответственно.

Построение нейро-нечеткого регулятора выполнено с использованием редактора anfisedit. При генерации системы нечеткого вывода использован

метод решетчатого разбиения, при реализации которого производится выбор количества термов для каждой входной переменной, типа ФП для входных переменных и выходного параметра. В данной модели НН структуры сформировано 27 правил. Переменные определялись треугольными и гауссовыми ФП.

Архитектура построенной нейро-нечеткой системы, рис. 3, состоит из следующих элементов:

- три входных переменных: ошибка управления E ; интеграл ошибки IE ; производная от ошибки DE ;
- выходная переменная – сигнал управления U ;
- три функции принадлежности треугольного вида (также рассмотрен вариант гауссовой ФП) для каждой из входных переменных;
- двадцать семь продукционных правил нечеткого вывода по алгоритму Такаги - Сугено.

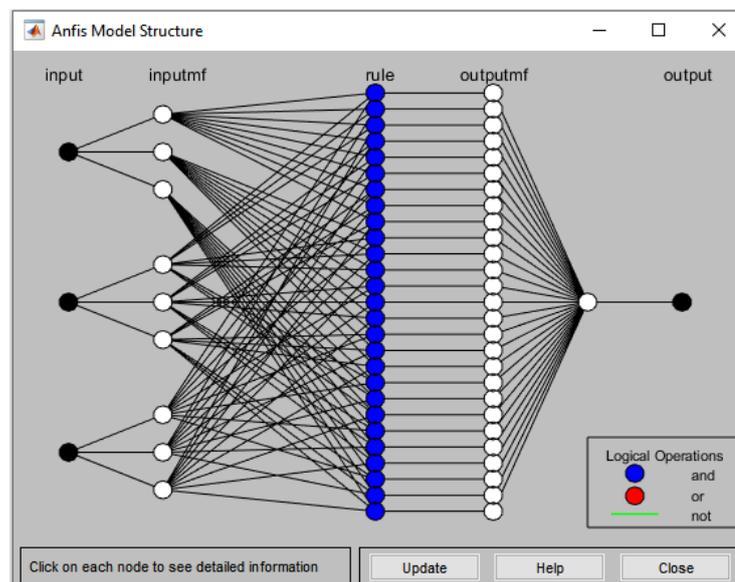


Рис. 3. Архитектура НН системы типа ANFIS

Обучение нейро-нечеткой сети выполнялось на базе гибридного метода. Оценка точности построения модели системы нечеткого вывода, с использованием обучающих и проверочных данных, проводилась на основе

метрики – среднеквадратической ошибки (root mean square error – RMSE) [9], которая определялась на обучающих и проверочных данных:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2},$$

где y_i – множество обучаемых данных; \hat{y}_i – расчетные данные; n – количество точек в обучающей выборке.

Результаты обучения нейро-нечеткой продукционной сети приведены в табл. 1. Точность при использовании треугольных функций принадлежности равна $2,636 \cdot 10^{-5}$, гауссовых ФП – $2,635 \cdot 10^{-5}$. Очень близкие результаты расчета показателя RMSE.

Таблица 1

Результаты обучения нейро-нечеткой системы

Количество ФП входных переменных (три переменные)			Тип ФП входа	Тип ФП выхода	RMSE
<i>E</i>	<i>IE</i>	<i>DE</i>			
3	3	3	Треугольная	Линейная	$2,636 \cdot 10^{-5}$
3	3	3	Гауссова	Линейная	$2,635 \cdot 10^{-5}$

Реализация редактора правил в MATLAB Fuzzy Logic Toolbox на основе гауссовых ФП показана на рис. 4.

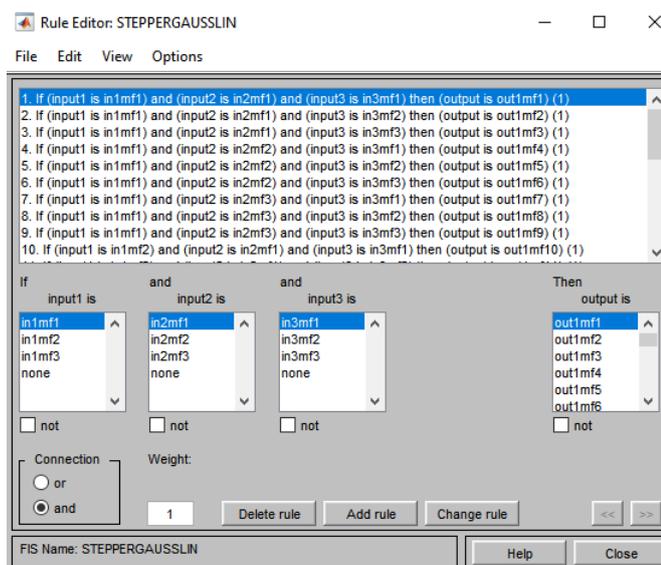


Рис. 4. Реализация редактора правил в MATLAB Fuzzy Logic Toolbox

Вычислительным экспериментом получены переходные характеристики $h(t)$ для САУ с непрерывным и нейро-нечетким ПИД-регуляторами, рис. 5.

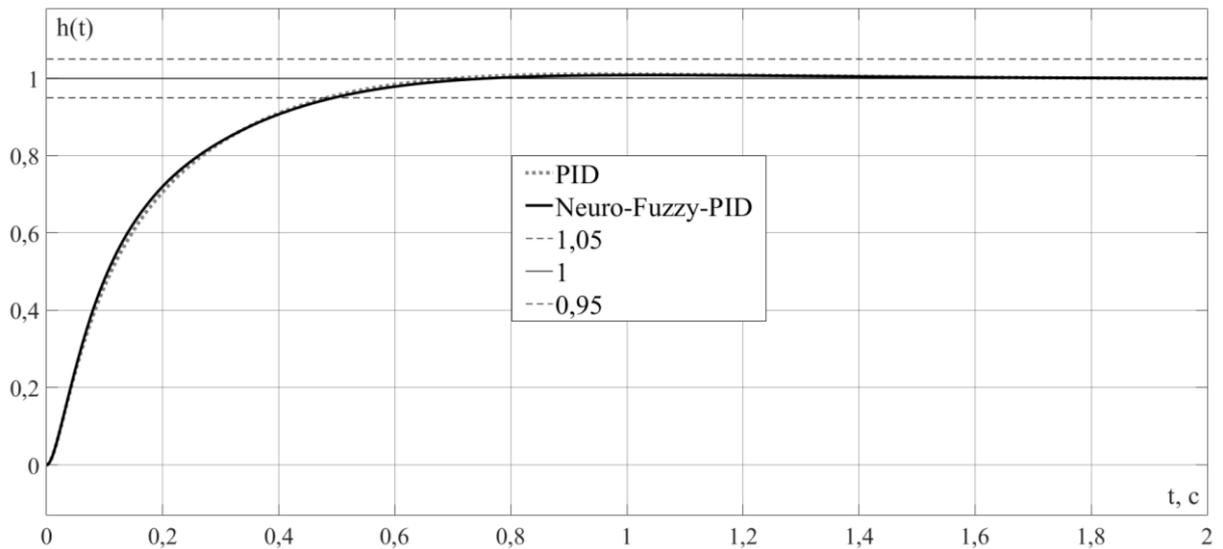


Рис. 5. Переходные характеристики САУ с непрерывным и нейро-нечетким регуляторами

В сравнительном анализе использованы непрерывный и нейро-нечеткий ПИД-регуляторы. Как видно из полученных кривых $h(t)$, рис. 5, они соответствуют апериодическому виду зависимости. Переходная характеристика $h(t)$ САУ с НН ПИД-регулятором имеет отклонение от эталонных данных при входе в пятипроцентную зону 2%. Прямые показатели качества: перерегулирование 0,71%; время регулирования САУ с непрерывным ПИД-регулятором – 0,485 с, с нейро-нечетким ПИД-регулятором – 0,495 с.

Результаты моделирования синтезированных регуляторов удовлетворяют требованиям разработчика к САУ шаговыми двигателями. Подтверждено высокое качество управления и быстродействие САУ с НН ПИД-регулятором.

Подходы к синтезу регуляторов на базе нечетких нейронных моделей дополняют друг друга и позволяют устранить недостатки искусственных нейронных сетей.

Выводы. В статье рассмотрена задача создания нейро-нечеткой системы управления шаговыми двигателями дорожного принтера. Реализован алгоритм обучения НН сети типа ANFIS. В результате моделирования переходной характеристики САУ с НН ПИД-регулятором получены прямые показатели качества, которые удовлетворяют требования проектировщика. Важными преимуществами применения НН-регуляторов по сравнению с непрерывными регуляторами является возможность обучения и цифровизация. Применение цифровых интеллектуальных регуляторов предпочтительно для САУ шаговыми двигателями дорожных принтеров, работающих в условиях значительных колебаний внешних возмущений.

Литература

1. Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Климов А.С., Кравцов К.С., Турышева Е.С. О параметрическом синтезе регулятора системы управления шаговыми двигателями дорожного принтера // Инженерный вестник Дона, 2022, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7439.
2. Ali M., Mailah M., Moiduddin K., Ameen W., & Alkhalefah H. Development of an Autonomous Robotics Platform for Road Marks Painting Using Laser Simulator and Sensor Fusion Technique // Robotica, 2021, 39(3), pp. 535-556.
3. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd ed.). London: Imperial College Press, 2009. URL: cuxtp.ucoz.ru/pdf/Aidan_O_Dwyer_Handbook_of_PI_and_PID_Controller_Tuning_Rules.pdf.

4. Ярцев А.В., Синютин С.А. Изучение энергопотребления в модели шагового двигателя // Инженерный вестник Дона, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7283.

5. Красовский А.Б. Способ повышения быстродействия шагового электропривода // Наука и образование, 2013, 9, с. 511-518.

6. Kabde A.B. and Savio A.D. Position Control of Stepping Motor // J. Adv. Res. Elec., Electr. Instr.Eng., 2014, 3, pp. 8974-8981.

7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116-132.

8. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1993, vol. 23, no. 3, pp. 665-684.

9. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001. 728 p.

10. Теория управления (дополнительные главы) / Под ред. Д.А. Новикова. М.: Ленанд, 2019. 552 с.

11. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

References

1. Emel'yanov R.T., Prokop'ev A.P., Klimov A.S., Kravcov K.S., Turysheva E.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7439.

2. Ali, M., Mailah, M., Moiduddin, K., Ameen, W., & Alkhalefah, H. Development of an Autonomous Robotics Platform for Road Marks Painting Using Laser Simulator and Sensor Fusion Technique. Robotica, 2021, 39(3), pp. 535-556.

3. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd ed.). London: Imperial College Press, 2009. URL:



cyxtp.ucoz.ru/pdf/Aidan_O_Dwyer_Handbook_of_PI_and_PID_Controller_Tuning_Rules.pdf.

4. Yarcev A.V., Sinyutin S.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7283.

5. Krasovskij A.B. Nauka i obrazovanie, 2013, 9, pp. 511-518.

6. Kabde A.B. and Savio A.D. J. Adv. Res. Elec., Electr. Instr. Eng., 2014, 3, pp. 8974-8981.

7. Takagi T., Sugeno M. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116-132.

8. Jang J.-S.R. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1993, vol. 23, no. 3, pp. 665-684.

9. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001. 728 p.

10. Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy) [Management Theory (additional chapters)] / Pod red. D.A. Novikova. M.: Lenand, 2019. 552 p.

11. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [The design of fuzzy systems by means of MATLAB]. M.: Goryachaya liniya. Telekom, 2007. 288 p.