

## Автоматизированная нейро-нечеткая система управления приводом шнекового дозатора печатающей головки строительного 3D-принтера

*Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, Г.П. Баранова, И.А. Фролов, С.В. Пиндур*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

**Аннотация:** Рассмотрена задача синтеза параметров системы управления приводом ответственного узла строительного 3D-принтера – шнекового дозатора печатающей головки с использованием метода нейро-нечеткого управления. Описан алгоритм построения интеллектуальной системы управления приводом. Получена обучающая выборка по данным переменных, определенных в результате моделирования системы автоматического управления с непрерывным пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором. Обучение нейро-нечеткой системы вывода в программной среде MATLAB выполнено с использованием гибридного метода. Получены переходные характеристики системы управления с непрерывным и нейро-нечетким пропорционально-дифференцирующим (ПД) регуляторами. Определены прямые показатели качества рассмотренных систем управления, а также проведен анализ этих результатов. Использование нейро-нечеткого управления приводом шнекового дозатора печатающей головки 3D-принтера позволило получить желаемый переходный процесс, подтвержденный в результате вычислительного эксперимента.

**Ключевые слова:** 3D-принтер, привод шнекового дозатора, печатающая головка, бетонная смесь, передаточная функция, пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор, нейро-нечеткая система вывода.

Использование аддитивных технологий в строительной отрасли представляет практический и научный интерес для производителей и исследователей [1 - 3]. Они базируются на технологии трехмерной печати (Three-Dimensional Printing Technology – 3DPT). Печать бетонных изделий отличается от печати полимерных, так как на этапе процесса движения бетонной смеси от жидкой фазы внутри сопла до печатного слоя, еще находящегося в пастообразном состоянии, происходят физические и химические изменения, все еще находящегося в состоянии пасты, гидратируя до твердой формы.

Получил распространение метод 3D-экструзионной бетонной печати, при котором осуществляется предварительное перемешивание материалов и подача бетонной смеси в экструдер. Экструдруемый материал должен

---

соответствовать свойствам прокачиваемости, печатаемости, технологичности сборки и времени применения [4]. Для 3Д-печати бетонных объектов доступно много вариантов цементных печатных материалов [5].

Технология строительства зданий с использованием методов 3DPT сформировалась в результате интеграции трех основных элементов [6]:

- конструктивно-структурного, представленного в виде цифровой модели;
- роботизированного, включающего в себя системы управления, перемещения и позиционирования формирующего устройства;
- формовочно-технологического, включающего в себя составы строительных смесей, оборудования, операции и режимы их приготовления, формования и обеспечения условий для достижения проектных свойств.

Задачи обеспечения оптимального функционирования всех элементов 3DPT решаются на базе междисциплинарных исследований.

Типовой процесс 3Д-печати включает в себя три основные части: программное обеспечение, оборудование и материал. В процессе работы шнекового дозатора, имеющего привод от электродвигателя (варианты привода: регулируемый гидромотор; шаговый двигатель), из-за изменения режима работы, могут появляться неблагоприятные для 3Д-печати явления – вибрация, резонанс, снижение точности позиционирования.

Печатающая головка строительного 3Д-принтера (рис. 1), предназначенного для печати многокомпонентной смесью, содержит смеситель - экструдер 1, включающий в себя корпус 2, шнек, содержащий цилиндрическую и коническую части 3, клапаны для подачи отдельных компонентов смеси 4 и привод шнека 5, и сопло 6 [7].

Конструкция печатающих головок 3Д-принтеров постоянно совершенствуется [8]. Для снижения влияния колебательного процесса

привода шнекового дозатора предложено разработать систему управления на базе методов искусственного интеллекта.

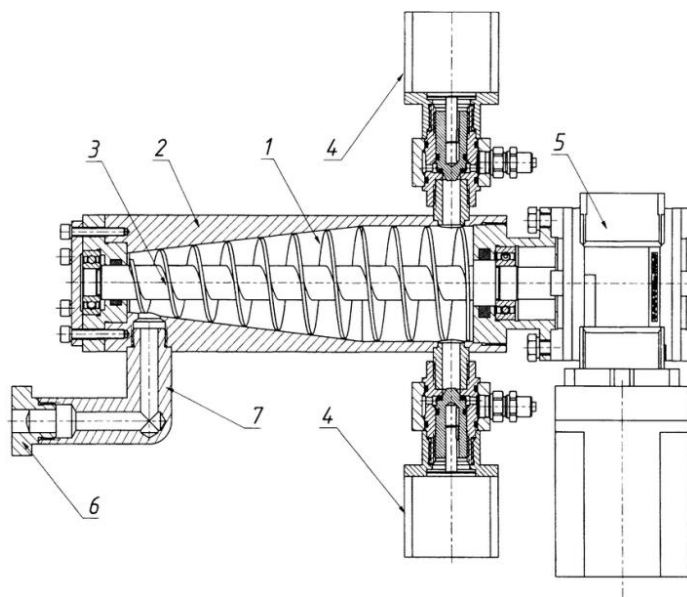


Рис. 1. Общий вид печатающей головки строительного 3Д-принтера [7]

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

Объектом исследования является система управления приводом шнекового дозатора печатающей головки 3Д-принтера.

Предмет исследования – переходные характеристики системы управления.

В работе предложен вариант системы управления на базе нейро-нечеткой (НН) системы вывода (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System – ANFIS) [9], обладающей достоинствами искусственных нейронных сетей к обучению, и нечеткого вывода, позволяющего использовать при синтезе параметров системы экспертные знания [9, 10].

Рассматривается класс линейных стационарных систем автоматического управления (САУ), рис. 2.

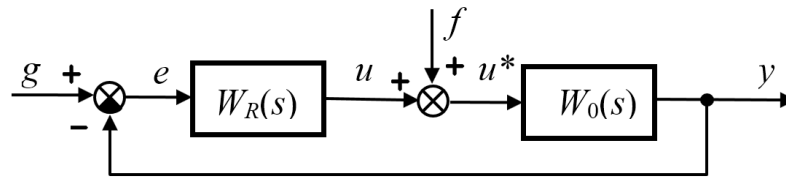


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления

На рис. 1:  $u$  и  $y$  – регулируемый вход и регулируемый выход соответственно;  $g$  – задание;  $e$  – ошибка:  $e = g - y$ ;  $f$  – возмущение;  $W_R(s)$  и  $W_0(s)$  – передаточные функции (ПФ) регулятора и объекта управления (ОУ) соответственно;  $s$  – оператор Лапласа.

Принято, 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 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.

Передаточная функция объекта управления определена по аналогу [11]:

$$W_0(s) = \frac{1,28 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,024 \cdot s^2 + 0,64 \cdot s + 0,03}{\left[ \begin{array}{l} 8,28 \cdot 10^{-6} \cdot s^6 + 8,67 \cdot 10^{-3} \cdot s^5 + 5,078 \cdot s^4 + \\ + 178 \cdot s^3 + 862 \cdot s^2 + 413,8 \cdot s + 3,176 \end{array} \right]} \quad (3)$$

Рассматривается интеллектуальная САУ для системы типа: «много входов – один выход» (many inputs - single outputs – MISO). Нейро-нечеткий пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор синтезируется на основе системы типа ANFIS, которая представляет собой структуру

пятислойной искусственной нейронной сети прямого действия с нечеткой моделью вывода типа Такаджи - Суджено (ТС) [9].

Алгоритм синтеза параметров модели НН ПД-регулятора.

Шаг 1. Параметрический синтез непрерывного пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора САУ с объектом управления высокого порядка, с использованием методик, опубликованных в научных работах [12, 13].

Шаг 2. Моделирование САУ и проверка ее на устойчивость. Формирование обучающей выборки для модели НН ПД-регулятора на основе результатов моделирования САУ с непрерывным ПИД-регулятором и определением данных временных переменных: ошибка управления; производная от ошибки; сигнал управления.

Шаг 3. Запуск ANFIS-редактора в режиме командной строки программы MATLAB с помощью ввода имени anfisedit, которая реализует создание моделей систем нейро-нечеткого вывода и обучение НН системы, визуализирует структуру НН сети. Загрузка обучающей выборки данных.

Шаг 4. Определение архитектуры нейро-нечеткого регулятора, количества термов и типа функции принадлежности (ФП). Создание исходной системы нечеткого логического вывода в области генерирования.

Шаг 5. Обучение НН системы.

Шаг 6. Тестирование НН системы. Проверка.

Шаг 7. Сохранение НН системы под названием \*.fis.

Шаг 8. Моделирование САУ с непрерывным ПИД- и нейро-нечетким ПД-регуляторами. Анализ прямых показателей качества переходных характеристик.

Синтез параметров непрерывного ПИД-регулятора САУ.

Прямые показатели качества определяются по переходной функции системы – ее реакции на ступенчатое входное воздействие. Наличие нулей –

---

корней полинома числителя ПФ изменяет форму переходной функции, так как на основной переходный процесс накладываются переходные процессы, вызванные импульсными функциями – производными по временам от ступенчатой функции. Чтобы получить истинное представление о переходном процессе в системе, необходимо анализировать базовую передаточную функцию, т.е. функцию, которая не содержит нулей [12]:

$$\Phi_0(s) = b_0 / \sum_{i=0}^n a_i(s),$$

По виду переходной функции можно количественно оценить качество процессов управления системой. Оно считается удовлетворительным, если регулируемая величина совершает не более трех колебаний вблизи нового положения равновесия [12].

Передаточная функция объекта управления для исследования переходного процесса скорректирована:

$$W_o(s) = \frac{200}{\left[ \begin{array}{l} 8,28 \cdot 10^{-6} \cdot s^6 + 8,67 \cdot 10^{-3} \cdot s^5 + 5,078 \cdot s^4 + \\ + 178 \cdot s^3 + 862 \cdot s^2 + 413,8 \cdot s + 3,176 \end{array} \right]} \quad (4)$$

Выполнено моделирование переходной характеристики системы с обратной связью и ПФ ОУ вида (4), рис. 3. Выводы по результатам анализа переходной характеристики: система устойчивая; присутствует колебательный процесс; время установления значительно превышает желаемое значение; требуется синтез параметров ПИД-регулятора.

На основе методики научной работы [13] выполнен параметрический синтез ПИД-регулятора системы с ОУ высокого порядка. Определены коэффициенты ПИД-регулятора:  $K_P = 2,109$ ,  $K_I = 5,904 \cdot 10^{-3}$ ,  $K_D = 2,829$ . Выполнено моделирование переходной характеристики САУ. Система практически без перерегулирования; аperiodический процесс; время установления - 4,8 с, что удовлетворяет требования разработчика.

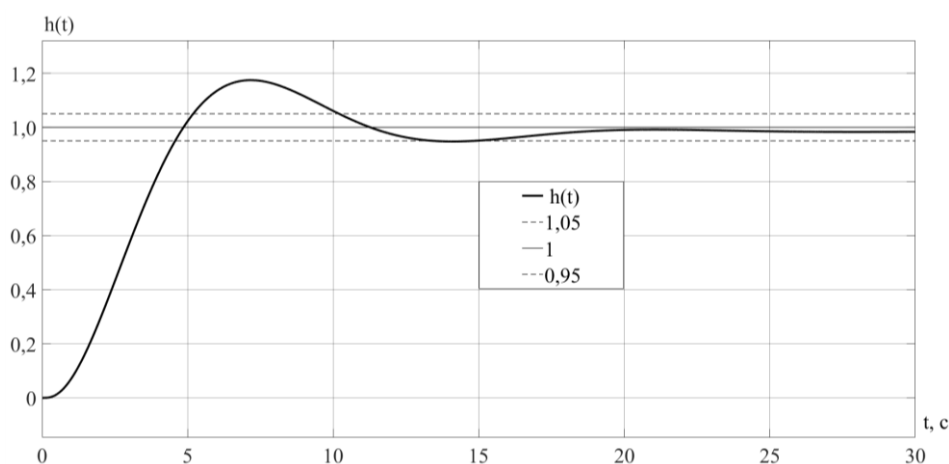


Рис. 3. Переходная характеристика системы с обратной связью

На языке программы MATLAB/Simulink построена имитационная модель САУ с непрерывным и НН ПД-регуляторами, рис. 4. 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. В данной модели НН структуры сформировано 9 правил. Переменные определялись треугольными и гауссовыми ФП.

Архитектура построенной нейро-нечеткой системы состоит из следующих элементов:

- две входных переменных: ошибка управления  $E$ ; производная от ошибки  $DE$ ;
- выходная переменная – сигнал управления  $U$ ;
- три функции принадлежности треугольного вида (также рассмотрен вариант гауссовой ФП) для каждой из входных переменных;

– продукционные правила нечеткого вывода по алгоритму Такаджи - Суджено.

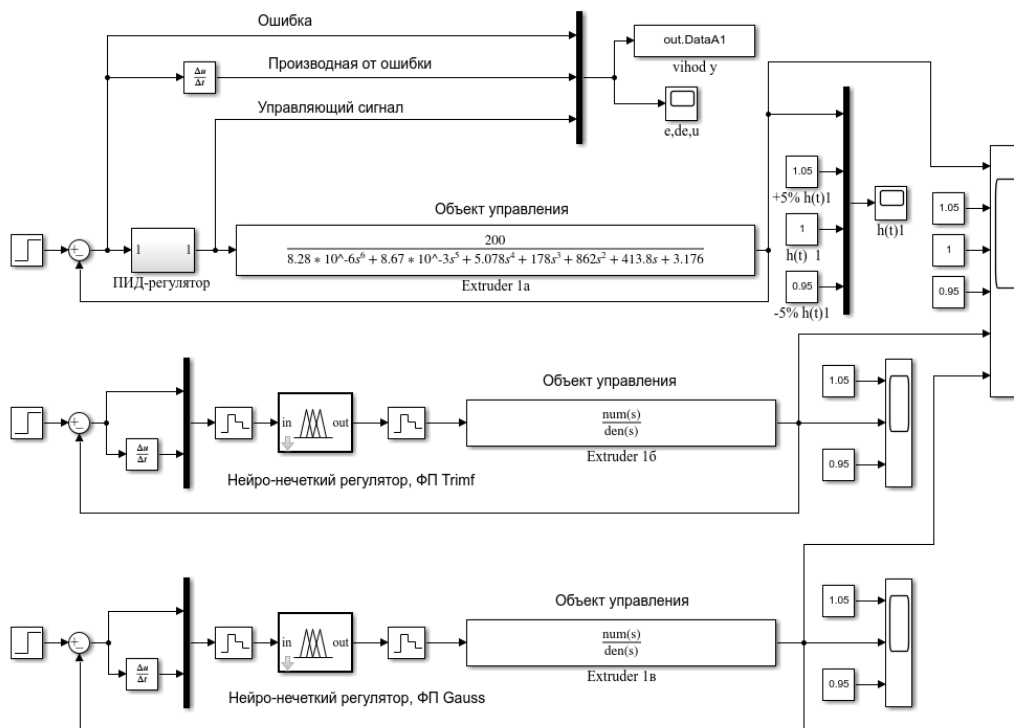


Рис. 4. Имитационная модель системы автоматического управления с непрерывным и нейро-нечеткими регуляторами

Окна редактора НН системы в программе MATLAB с данными выборки и заданием количества и типа ФП, приведено на рис. 5.

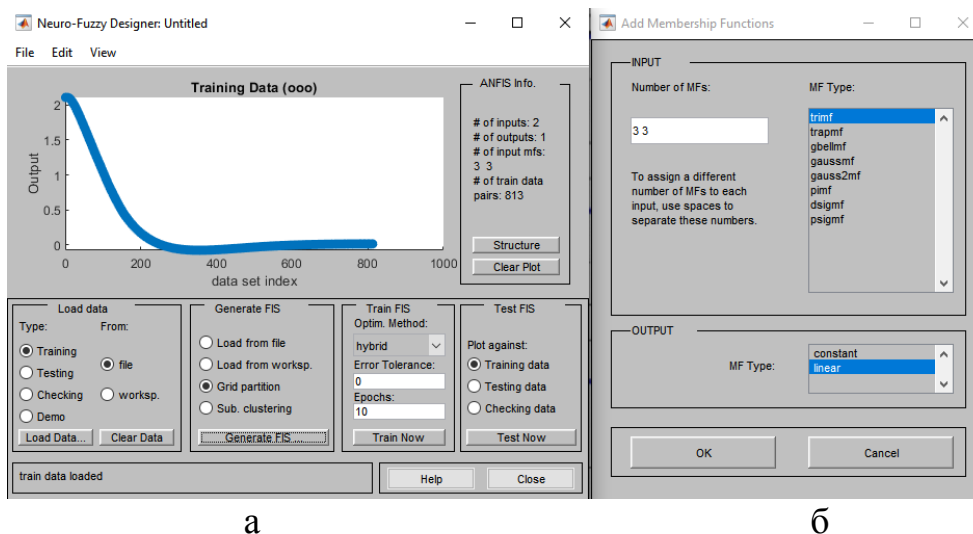


Рис. 5. Окно ANFIS-редактора НН системы: а – загрузка данных; б – выбор количества и типа ФП



Архитектура построенной НН системы типа ANFIS приведена на рис.

6.

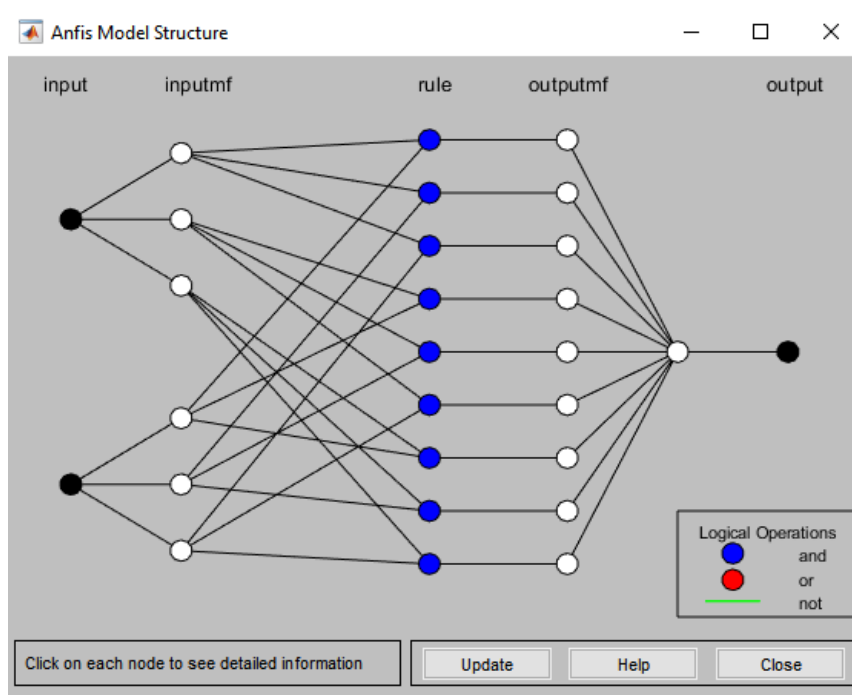


Рис. 6. Структура модели системы нечеткого вывода типа ANFIS

Обучение НН системы выполнялось на основе гибридного метода. Оценка точности построения модели системы нечеткого вывода проводилась на основе метрики – среднеквадратической ошибки (root mean square error – RMSE) [10], которая определялась на обучающих и проверочных данных:

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

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

Результаты обучения нейро-нечеткой системы приведены в табл. 1. Точность при использовании треугольных ФП равна  $2,392 \cdot 10^{-5}$ , гауссовых ФП –  $5,678 \cdot 10^{-5}$ . Модель на основе треугольных ФП показала лучший результат.

Проверка модели на адекватность и ее работа в среде MATLAB выполнена в процедуре средство просмотра правил Rule Viewer (рис. 7), где

задаются значения исходных данных и автоматически выводится значение результирующей переменной.

Таблица 1

Результаты обучения НН системы

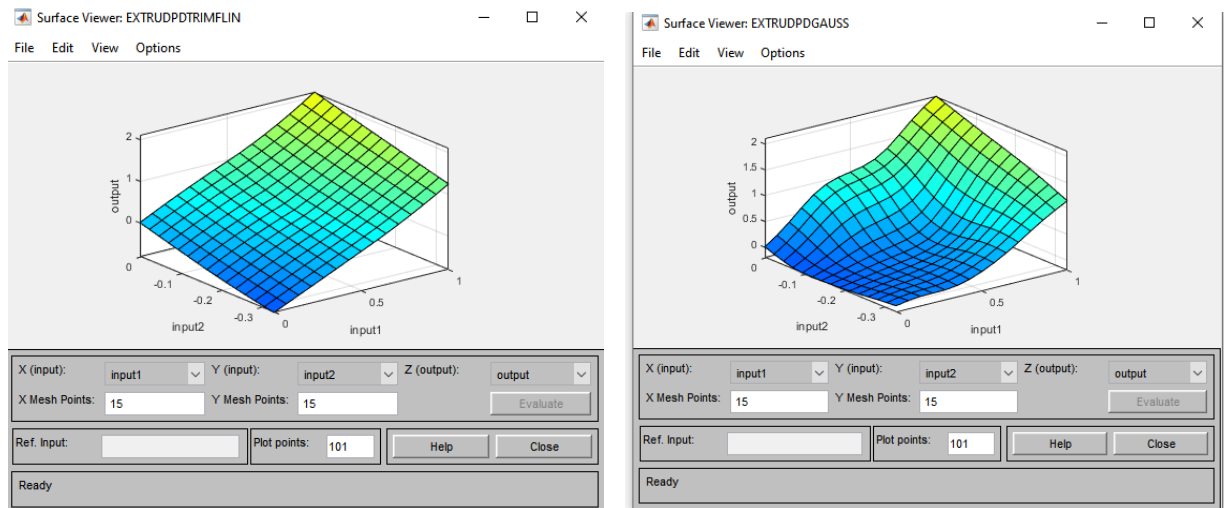
Количество ФП входных переменных		Тип ФП входа	Тип ФП выхода	RMSE
$E$	$DE$			
3	3	Треугольная	Линейная	$2,392 \cdot 10^{-5}$
3	3	Гауссова	Линейная	$5,678 \cdot 10^{-5}$

На рис. 7 для входных переменных  $E = 0,497$ ;  $DE = -0,164$  модели системы нечеткого вывода, на основе треугольных ФП получено значение управляющего сигнала  $U = 0,227$ , которое отличается от заданного  $0,2265$  на величину  $0,0005$ , что говорит о достаточной адекватности модели. Аналогичные результаты достоверности получены с моделью системы нечеткого вывода на основе гауссовых ФП.



Рис. 7. Окно просмотра правил в MATLAB Fuzzy Logic Toolbox

Построены графики поверхности системы нечеткого вывода  $output$  – сигнала управления  $U$ , от ошибки  $E$  –  $output1$  и производной от ошибки  $DE$  –  $output2$  управления, рис. 8.



а

б

Рис. 8. Графический интерфейс просмотра поверхности системы нечеткого вывода: а – треугольная ФП, б – гауссова ФП

Вычислительным экспериментом получены переходные характеристики  $h(t)$  для САУ с непрерывным ПИД- и нейро-нечеткими ПД-подобными регуляторами, рис. 9, рис. 10. В сравнительном анализе использованы непрерывный ПИД- и нейро-нечеткие ПД-регуляторы.

Как видно из полученных кривых  $h(t)$ , рис. 9 и рис. 10, они соответствуют апериодическому типу зависимости. Переходные характеристики  $h(t)$  САУ с НН ПД-регуляторами имеют отклонение от эталонных данных при входе в пятипроцентную зону меньше 0,5 %. Прямые показатели качества: без перерегулирования; время регулирования САУ с ПИД-регулятором 4,717 с, с НН ПД-регуляторами – 4,69 с для модели с треугольной ФП, 4,7 с – гауссовой ФП. Результаты моделирования синтезированных регуляторов удовлетворяют требованиям разработчика к

САУ приводом шнекового дозатора печатающей головки строительного 3Д-принтера.

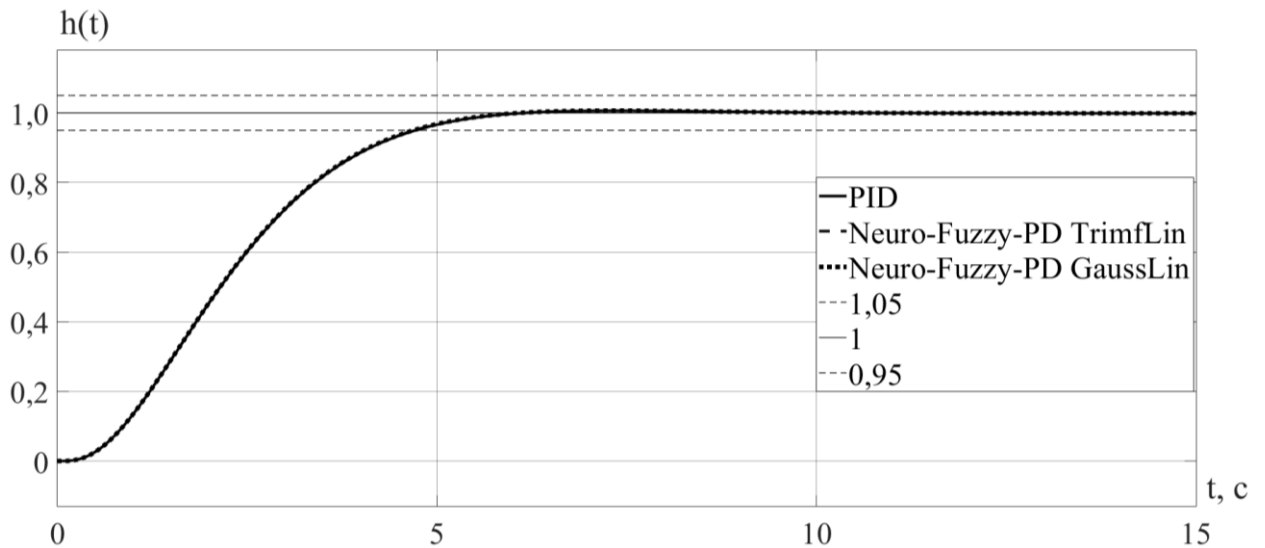


Рис. 9. Переходные характеристики САУ с непрерывным и нейро-нечеткими регуляторами

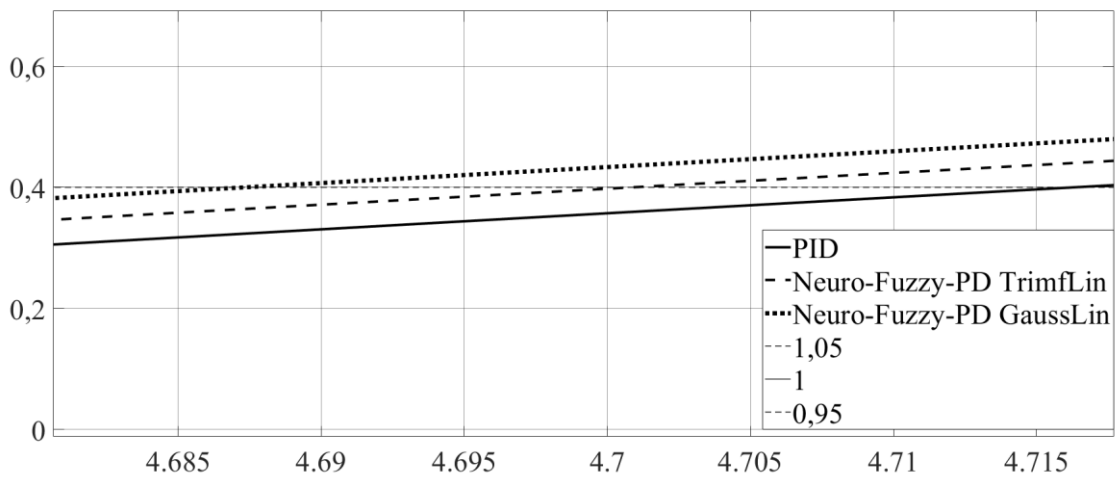


Рис. 10. Переходные характеристики САУ с непрерывным и нейро-нечеткими регуляторами в увеличенном масштабе

Подтверждено высокое качество управления и быстродействие САУ с НН ПД-регулятором.

**Выводы.** В статье рассмотрена задача создания нейро-нечеткой системы управления приводом шнекового дозатора печатающей головки

строительного 3Д-принтера. Реализован алгоритм обучения НН сети типа ANFIS. В результате моделирования переходной характеристики САУ с НН ПД-регулятором, получены прямые показатели качества, которые удовлетворяют требования разработчика. Важными преимуществами применения НН регуляторов по сравнению с непрерывными регуляторами являются возможности обучения и цифровизации. Применение цифровых интеллектуальных регуляторов предпочтительно для САУ приводами строительных 3Д-принтеров, работающих в условиях значительных колебаний возмущений при изменении режимных параметров и состава бетонной смеси.

### Литература

1. Абрамян С.Г., Илиев А.Б. Современные строительные аддитивные технологии. Часть 1 // Инженерный вестник Дона. 2018, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755/).
2. Фиговский О.Л., Штейнбок А.З. Новое в жилищном строительстве за рубежом. Часть I // Инженерный вестник Дона. 2020, № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6706/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6706/).
3. Figovsky O., Shteinbok A. Building 3D printing technology // Инженерный вестник Дона. 2022, № 5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7656/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7656/).
4. Lim, S.; Buswell, R.A.; Le, T.T.; Austin, S.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // Autom. Constr. 2012, № 21, pp. 262-268.
5. Cao, X.; Yu, S.; Cui, H.; Li, Z. 3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials: A Review // Buildings. 2022, № 12, p. 453.
6. Elistratkin, M.; Alfimova, N.; Podgornyi, D.; Olisov, A.; Promakhov, V.; Kozhukhova, N. Influence of Equipment Operation Parameters on the

Characteristics of a Track Produced with Construction 3D Printing // Buildings. 2022, № 12, p. 593.

7. Ноздрин Г.А., Щаулов В.В., Стародумова А.А. Печатающая головка строительного 3D принтера. Патент на полезную модель № 179153. Бюл. 2017, № 13. RL: [patentimages.storage.googleapis.com/23/8a/07/80f53beaad76a3/RU179153U1.pdf](https://patentimages.storage.googleapis.com/23/8a/07/80f53beaad76a3/RU179153U1.pdf).

8. Колесников А.Г. Модернизация конструкции экструдера строительного 3D принтера и подбор составов для него // Урбанистика. 2019. № 2. С. 64-70.

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

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

11. Ганиев Р.Н. Разработка, исследование и внедрение частотно-регулируемого электропривода экструдера в производстве автомобильных шин: монография. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технол. ин-т (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. 116 с.

12. Мирославский Д.Е. Метод коэффициентов и его применение для оценки качества автоматических систем и проектирования регуляторов // Точная наука. 2019. № 45. С. 83-93.

13. Prokopen A.P., Nabizhanov Zh.I., Ivanchura V.I. and Emelyanov R.T. Parametric synthesis method of PID controllers for high-order control systems // Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges, Studies in Systems, Decision and Control, 260, eds. G. Kravets et al., Springer Int Publishing Ag, 2020, pp. 91-102.

## References

1. Abramyan S.G., Iliev A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755/).
2. Figovskij O.L., SHtejn bok A.Z. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6706/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6706/).
3. Figovsky O., Shteinbok A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7656/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7656/).
4. Lim, S.; Buswell, R.A.; Le, T.T.; Austin, S.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. Autom. Constr., 2012, № 21, pp. 262-268.
5. Cao, X.; Yu, S.; Cui, H.; Li, Z. Buildings, 2022, № 12, p. 453.
6. Elistratkin, M.; Alfimova, N.; Podgorny, D.; Olisov, A.; Promakhov, V.; Kozhukhova, N. Buildings, 2022, № 12, p. 593.
7. Nozdrin G.A., Shchaulov V.V., Starodumova A.A. Pechatayushchaya golovka stroitel'nogo 3D printera. [Construction 3D printer print head]. Patent na poleznuyu model' № 179153. Byul. 2017. № 13. URL: [patentimages.storage.googleapis.com/23/8a/07/80f53beaad76a3/RU179153U1.pdf](https://patentimages.storage.googleapis.com/23/8a/07/80f53beaad76a3/RU179153U1.pdf).
8. Kolesnikov A.G. Urbanistika, 2019, № 2, pp. 64-70.
9. Jang J.-S.R. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, vol. 23, № 3, pp. 665-684.
10. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001. 728 p.
11. Ganiev R.N. Razrabotka, issledovanie i vnedrenie chastotno-reguliruemogo elektroprivoda ekstrudera v proizvodstve avtomobil'nyh shin: monografiya [Development, research and implementation of frequency-controlled electric extruder drive in the production of automobile tires]. Nizhnekamsk: Nizhnekamskij himiko-tekh nol. in-t (filial) FGBOU VPO «KNITU», 2015, 116 p.
12. Miroslavskij D.E. Tochnaya nauka, 2019, № 45, pp. 83-93.



13. Prokopen A.P., Nabizhanov Zh.I., Ivanchura V.I. and Emelyanov R.T. Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges, Studies in Systems, Decision and Control, 260, eds. G. Kravets et al., Springer Int Publishing Ag, 2020, pp. 91-102.