

Прокопьев, А.П. Применение технологии нейро-нечетких систем для управления плотностью асфальтобетонных смесей в процессе их укладки / А.П. Прокопьев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2023. – № 1. – С. 48–60. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.1.03

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Прокопьев, А. П. Применение технологии нейро-нечетких систем для управления плотностью асфальтобетонных смесей в процессе их укладки / А. П. Прокопьев. – текст : непосредственный. – DOI: 10.15593/2499-9873/2023.1.03 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2023. – № 1. – С. 48–60.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 1, 2023

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.1.03

УДК 004.896:69.002.5



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ УКЛАДКИ

А.П. Прокопьев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 декабря 2022

Одобрена: 25 января 2023

Принята к публикации:
10 марта 2023

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора

100 %.

Ключевые слова:

математическое моделирование, нейро-нечеткая система, гибридная сеть, ANFIS, продукционные правила, гибридный метод обучения, RMSE, функция принадлежности, ПИД-регулятор, передаточная функция высокого порядка, асфальтоукладчик, асфальтобетонная смесь, контроль плотности, система автоматического управления.

АННОТАЦИЯ

Увеличение количества легкового и грузового транспорта и интенсивность его использования напрямую отражаются на асфальтобетонных дорожных покрытиях автомобильных дорог. Это проявляется в сокращении межремонтных сроков эксплуатации и больших финансовых затратах. Повышение качества и увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог является народно-хозяйственной проблемой. Эта проблема решается за счет совершенствования нормативной базы, улучшения свойств дорожных материалов, оптимизации и автоматизации технологических процессов в дорожном строительстве. Системы контроля и управления плотностью дорожными катками базируются на технологиях интеллектуального уплотнения (Intelligent Compaction) и непрерывного контроля уплотнения (Continuous Compaction Control). В Российской Федерации качество строительства дорожных покрытий во многом зависят от результатов работы асфальтоукладчиков, которые обеспечивают приемку, укладку и уплотнение смесей. Многие дефекты покрытий при их эксплуатации устраняются за счет обеспечения качественного уплотнения. Системы автоматического контроля и управления процессом уплотнения для асфальтоукладчиков не разработаны.

Целью исследования является построение системы управления плотностью на основе интеллектуальной системы автоматического управления с обратной связью. За счет прогнозирования в режиме реального времени значения объемной плотности слоя организуется эффективное ручное (оператором) и автоматическое управление плотностью для достижения требуемых показателей качества.

В статье представлены результаты разработки новой системы интеллектуального управления плотностью асфальтобетонных смесей укладчиками. В состав системы автоматического управления с обратной связью входит система непрерывного контроля плотности, предназначенная для вычисления показателя качества уплотнения на базе реализации алгоритма нейросетевой структуры в режиме реального времени, а также нейро-нечеткий ПИД-регулятор. В исследовании рассмотрена система с моделями объектов управления высокого порядка – четвертого и шестого порядков. Предложена структура нейронечеткой сети типа ANFIS. Генерация системы нечеткого вывода выполнена на основе метода решетчатого разбиения. Обучение ANFIS выполнено гибридным методом по массиву переменных, полученных в результате моделирования системы автоматического управления с аналоговым ПИД-регулятором. Возможные режимы использования интеллектуальной системы управления уплотнения: непрерывный автоматический контроль с ручным управлением рабочими режимами уплотнением; автоматическое управление плотностью. Автоматизация контроля плотности и управления режимами уплотнения направлена на улучшение качества асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог и повышение эффективности технологических процессов дорожного строительства.

© ПНИПУ

© Прокопьев Андрей Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов и технологии строительства, e-mail: prok1@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2838-7350.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Prokopev A.P. Application of neuro-fuzzy systems technology for control the density of asphalt concrete mixtures in the paving process. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2023, no. 1, pp. 48–60. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.1.03

MDPI and ACS Style: Prokopev, A.P. Application of neuro-fuzzy systems technology for control the density of asphalt concrete mixtures in the paving process. *Appl. Math. Control Sci.* **2023**, 1, 48–60. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.1.03>

Chicago/Turabian Style: Prokopev, Andrey. 2023. “Application of neuro-fuzzy systems technology for control the density of asphalt concrete mixtures in the paving process”. *Appl. Math. Control Sci.* no. 1: 48–60. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.1.03>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES
№ 1, 2023
<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.1.03

UDK 004.896:69.002.5



APPLICATION OF NEURO-FUZZY SYSTEMS TECHNOLOGY FOR CONTROL THE DENSITY OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES IN THE PAVING PROCESS

A.P. Prokopev

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

ARTICLE INFO

Received: 24 December 2022

Approved: 25 January 2023

Accepted for publication:

10 March 2023

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions

100 %.

Keywords:

mathematical modeling, neuro-fuzzy system, hybrid network, ANFIS, production rules, hybrid training method, RMSE, membership function, PID controller, high-order transfer function, paver, asphalt concrete mixture, density control, automatic control systems.

ABSTRACT

The increase in the number of cars and trucks, and the intensity of their use, directly affects the asphalt-concrete road surfaces of roads. This is manifested in the reduction of overhaul terms of operation and large financial costs. Improving the quality and increasing the service life of asphalt concrete pavements of roads is a national economic problem. This problem is solved by improving the regulatory framework, improving the properties of road materials, optimizing and automating technological processes in road construction. Road roller density monitoring and control systems are based on Intelligent Compaction and Continuous Compaction Control technologies. In the Russian Federation, the quality of road surface construction largely depends on the results of the work of pavers, who ensure the acceptance, laying and compaction of mixtures. Many defects in the operation of road surfaces are eliminated by high-quality compaction. Automatic control and control of the sealing process for asphalt pavers have not been developed.

The aim of the study is to build a density management system for asphalt pavers based on an intelligent automatic control system with feedback. Real-time prediction of the volume density of the layer, effective manual (operator) and automatic density control is organized to achieve the required quality indicators.

The results of the development of a new system for intelligent control of the density asphalt concrete mixtures by pavers is considered. The automatic control system with feedback includes a continuous density control system designed to calculate the seal quality index based on the implementation of the neural network structure algorithm in real time, as well as a neuro-fuzzy PID regulator. The study considers a system with models of control objects of high order – the fourth and sixth orders. The structure of a neuro-fuzzy network of the ANFIS type is proposed. The generation of a fuzzy output system is performed on the basis of the lattice partition method. ANFIS training is performed by a hybrid method on an array of variables obtained as a result of modeling an automatic control system with an analog PID controller. Possible modes of use an intelligent compaction control system: continuous automatic control with manual control of the operating modes of compaction; automatic density control. Automatic measure of density and control compaction modes is aimed at improving the quality of asphalt concrete pavements of roads and improving the quality of asphalt pavements efficiency of technological processes road construction.

© PNRPU

© **Andrey P. Prokopev** – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Building Materials and Construction Technology Department, e-mail: prok1@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2838-7350.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

Повышение качества и увеличение срока службы асфальтобетонных (АБ) покрытий автомобильных дорог является народно-хозяйственной проблемой. За счет получения нормативной объемной плотности асфальтобетонных смесей при уплотнении асфальтоукладчиками и дорожными катками можно устранить до половины всех недостатков АБ-покрытий [1; 2].

Асфальтоукладчики обеспечивают приемку АБ-смеси, транспортирование и распределение АБ-смеси по ширине покрытия, ровность поверхности и уплотнение АБ-смесей. Операторы, управляющие асфальтоукладчиками, испытывают значительные физические и умственные нагрузки, что может приводить к ошибкам принятия решений. Все процессы, за исключением процесса уплотнения, в асфальтоукладчиках автоматизированы. Современные асфальтоукладчики имеют высокую уплотняющую способность и могут соответствовать нормативным [3; 4]. Уплотнение АБ-смесей асфальтоукладчиками происходит при температуре $140 \div 130$ °С, когда сопротивление смеси воздействиям уплотнителей меньше. Дорожные катки легкого, среднего и тяжелого типов уплотняют АБ-смеси при $120 \div 80$ °С, что сопровождается повышенным сопротивлением смеси. С возрастанием плотности асфальтобетонных смесей увеличиваются её физико-механические свойства [5; 6]. Это подтверждается зависимостью модуля упругости АБ-смеси от показателя степени уплотнения при различных значениях температуры смеси. Так, при температуре смеси 90 °С и степени уплотнения 95 % модуль упругости равен 850 МПа, при 100 °С – 600 МПа, при 110 °С – 450 МПа, при 120 °С – 350 МПа, при 130 °С – 280 МПа [7]. С учетом этих экспериментальных данных рекомендуемый оптимальный диапазон температуры АБ-смеси для процесса уплотнения $130 \div 100$ °С при изменении модуля упругости 280 МПа \div 600 МПа соответственно.

За рубежом при строительстве верхних слоев покрытий применяются повышенные скорости укладки смеси. Так, в США скорость укладки составляет до 20 м/мин с обязательным использованием мероприятий по обеспечению уменьшения фракционной и температурной сегрегации смеси, а также автоматическим контролем температуры и нивелированием по ширине покрытия. В странах Европы скорость укладки смесей составляет до $6 \div 7$ м/мин, а в Российской Федерации – $2 \div 5$ м/мин. Поэтому в США и Европе повышенное внимание при строительстве уделяется рабочим процессам дорожных катков. Ведущими производителями катков разработаны системы интеллектуального уплотнения (IC – Intelligent Compaction,) и непрерывного контроля уплотнения (ССС – Continuous Compaction Control). Для строительства дорожных покрытий в Российской Федерации актуально применение на асфальтоукладчиках систем непрерывного контроля плотности и автоматического управления процессом уплотнения.

Методы

В работе предложена идея интеллектуализации процесса управления уплотнением АБ-смесей, заключающаяся в обосновании и разработке новых методов непрерывного автоматизированного контроля плотности АБ-смесей, новых алгоритмов синтеза систем управления на основе методов современной теории автоматического управления и искусственного интеллекта.

Целью работы является создание системы управления плотностью асфальтобетонных смесей укладчиками, организованной как интеллектуальная система автоматического

управления (САУ) с обратной связью, состоящей из интеллектуальной системы автоматического контроля уплотнения (САКУ) и интеллектуального регулятора пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) типа, предназначенной для определения в режиме реального времени коэффициента уплотнения АБ-смеси (формирование информации о качестве уплотнения и рекомендаций для машиниста), а также автоматического управления коэффициентом уплотнения. Интеллектуальная САКУ и регулятор могут быть созданы на базе технологий искусственного интеллекта – искусственных нейронных сетей, гибридных сетей (нейро-нечетких сетей), нечеткой логики.

Асфальтоукладчики деформируют дорожно-строительные смеси рабочим органом с трамбуемым брусом, совершающим колебательное движение за счет кинематического привода (процесс завершается за $4 \div 6$ трамбуемых воздействий), вибрационной плитой, прессирующими планками. Вибрационная плита, находясь в постоянном контакте с поверхностью, обеспечивает улучшение структуры слоя и закрепляет достигнутую в результате работы трамбуемого бруса плотность слоя АБ-покрытия.

Амплитуда колебаний уплотнителя зависит от динамических переменных рабочего органа и физико-механических характеристик уплотняемого материала и непрерывно изменяется. Поэтому паспортные характеристики рабочих органов следует корректировать с учетом реологических свойств уплотняемого материала [8].

Вопросам создания системы автоматического контроля качества уплотнения АБ-смесей на базе нейросетевых структур посвящены работы [9–11]. Вариант функциональной схемы системы автоматического управления уплотнением асфальтоукладчиками, реализующей новый метод на основе переменных данных x_1, \dots, x_5 рабочего процесса, представлен на рис. 1.

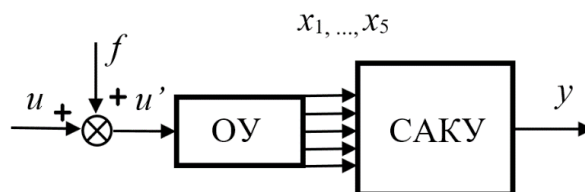


Рис. 1. Функциональная схема системы непрерывного контроля плотности

Обозначение на рис. 1: u – регулирующий параметр объекта, изменение которого осуществляет оператор в зависимости от полученного значения плотности; f – возмущение; $u' = u + f$; ОУ – объект управления; y – объемная плотность асфальтобетонной смеси после прохода АУ; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – переменные на входе САКУ: идентификатор типа АБ-смеси, скорость движения асфальтоукладчика, максимальное усилие в толкателе трамбуемого бруса, частота ударов трамбуемого бруса, толщина уплотняемого слоя покрытия соответственно. Объектом управления является процесс взаимодействия уплотняющего рабочего органа укладчика (трамбуемый брус – вибрационная плита) и асфальтобетонной смеси.

Модель системы автоматического контроля уплотнения:

$$G_{mb} = \theta(\text{Type}, T_a, V, F, a_p, f_t, h),$$

где Type – идентификатор типа АБ-смеси; T_a – температура асфальтобетонного покрытия, °С; V – скорость движения асфальтоукладчика, м/мин; F – максимальное усилие в толкателе трамбуемого бруса, Н; f_t – частота колебаний трамбуемого бруса, Гц; a_p – вертикальное ускорение вибрационной плиты, м/с^2 ; h – толщина уплотняемого слоя, м.

Современный подход внедрения инновационных технологий в область строительства инфраструктурных объектов автомобильного транспорта связан с задачей создания киберфизической системы управления плотностью АБ-смесей [12; 13]. Для обеспечения эффективности технологических процессов в таких проектах требуется непрерывный контроль качества плотности и управление звеном дорожных машин. В работе [12] предложены варианты интеллектуальной системы контроля и управления плотностью асфальтобетонной смеси укладчиками и вибрационными катками, функционирующими на базе нейросетевой структуры и цифровых ПИД-регуляторов. Функциональная схема САУ уплотнением АБ-смеси укладчиком приведена на рис. 2, где g_a – задающее воздействие (уставка); e_a – ошибка регулирования; u_a и y_a – регулируемый вход и регулируемый выход объекта соответственно; f_a – внешние возмущения, приложенные к входу объекта; ОУ_а – объект управления: процесс уплотнения асфальтоукладчиком; ПИД – ПИД-регулятор.

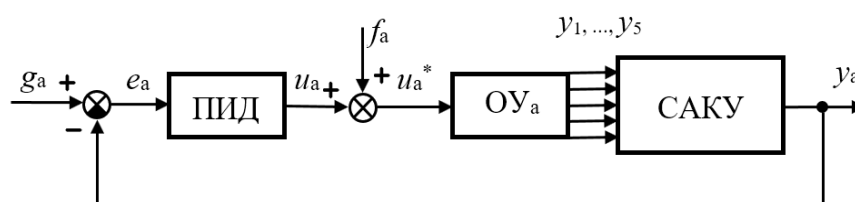


Рис. 2. Функциональная схема системы управления плотностью АБ-смесей укладчиком

Уставка задания САУ плотностью – объемная плотность асфальтобетонной смеси, определяется на этапе разработки проекта производства работ с учетом наличия в организации дорожных катков, автоматизированных катков, максимальной уплотняющей способности асфальтоукладчиков. Регулирующим параметром является частота уплотняющих воздействий трамбуемого бруса. Регулируемая переменная САУ плотностью y_a – плотность АБ-смеси, определяется интеллектуальной САКУ и непрерывно в форме информационного сигнала беспроводными средствами передается на приемники сигналов отряда дорожных машин.

Для разработки интеллектуальной системы управления процессом уплотнения предложено использовать гибридные нечеткие нейронные сети (ННС). Такие сети обладают способностями ИНС прямого распространения к обучению и систем нечеткой логики к хорошему объяснению выводов. Они могут быть реализованы для SISO (single input – single output, один вход – один выход) и MISO (multi input – single output, много входов – один выход) систем. Обучаемый нейро-нечеткий 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 превышает заданной уставки. Желаемым требованиям удовлетворяют гибридные ННС типа ANFIS (Adaptive – Network – Based Fuzzy Inference Systems – адаптивная сетевая нечеткая система вывода) предложенная Чангом (Jyh-Shing Roger Jang) в 2013 г. [14; 15]. Они представляют собой гибридные системы, которые объединяют методы искусственных нейронных сетей и нечеткой логики, имеют структуру пятислойной нейронной сети прямого действия с нечеткой моделью вывода типа Такаджи – Суджено (ТС, в англоязычной литературе Takagi – Sugeno – TS).

Рассматривается задача синтеза интеллектуальной САУ на базе создания нейро-нечеткой MISO-системы, имеющей три входные и одну выходную переменные, заданные, для сравнительного анализа прямых показателей качества, треугольной и колоколообразной функциями принадлежности (ФП).

Алгоритм синтеза модели нейро-нечеткого ПИД-регулятора.

Шаг 1. Разработка математической модели объекта управления, параметрический синтез непрерывного регулятора для САУ с объектом высокого порядка по методике [16].

Шаг 2. Тестирование построенной САУ в диапазоне известных режимов работы и проверка ее на устойчивость. Получение обучающей выборки для создания модели нейро-нечеткого регулятора на базе ANFIS с применением алгоритма нечеткого вывода TS в среде программы MATLAB.

Шаг 3. Определение структуры нейро-нечеткого регулятора.

Шаг 4. Запуск ANFIS-редактора (anfisedit) в среде MATLAB.

Шаг 5. Загрузка обучающей выборки.

Шаг 6. Создание исходной системы нечеткого логического вывода в области генерирования (команда Generate FIS).

Шаг 7. Обучение сети (команда Train FIS).

Шаг 8. Тестирование нечеткой сети (команда Test FIS).

Шаг 9. Сохранение разработанной системы под названием *.fis.

Шаг 10. Моделирование. Анализ переходной характеристики САУ.

Результаты

Синтез параметров цифрового ПИД-регулятора для САУ с объектами высокого порядка выполнен на основе методики, опубликованной в работе [16]. Компьютерная модель системы автоматического управления с объектами управления 4-го (асфальтоукладчик с рабочим органом «трамбующий брус – вибрационная плита») и 6-го порядков (асфальтоукладчик с рабочим органом «трамбующий брус – вибрационная плита – две прессующие планки») представлена на рис. 3. Время дискретизации определено в результате моделирования переходной характеристики САУ: $T = 0,01$ с.

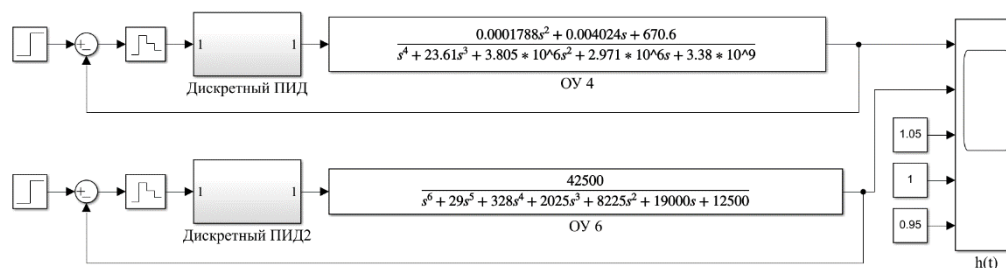


Рис. 3. Имитационная модель цифровой САУ с объектами управления четвертого и шестого порядка

Результаты моделирования переходной характеристики САУ $h(t)$ приведены на рис. 4.

Прямые показатели качества полученных переходных характеристик $h(t)$ удовлетворяют условиям на проектирование: без перерегулирования; время регулирования меньше 2 с. Переходная характеристика САУ с объектом шестого порядка имеет запаздывание 0,5 с.

В результате моделирования САУ с объектами четвертого и шестого порядков получен набор данных переменных для обучения нейро-нечетких ПИД-регуляторов: ошибка управления $E(x_1)$; производная ошибки $DE(x_2)$; интеграл ошибки $IE(x_3)$; управляющий сигнал U . Структура предлагаемой нейро-нечеткой MISO-системы (рис. 5), включает три входные переменные E , DE , IE и одну выходную U .

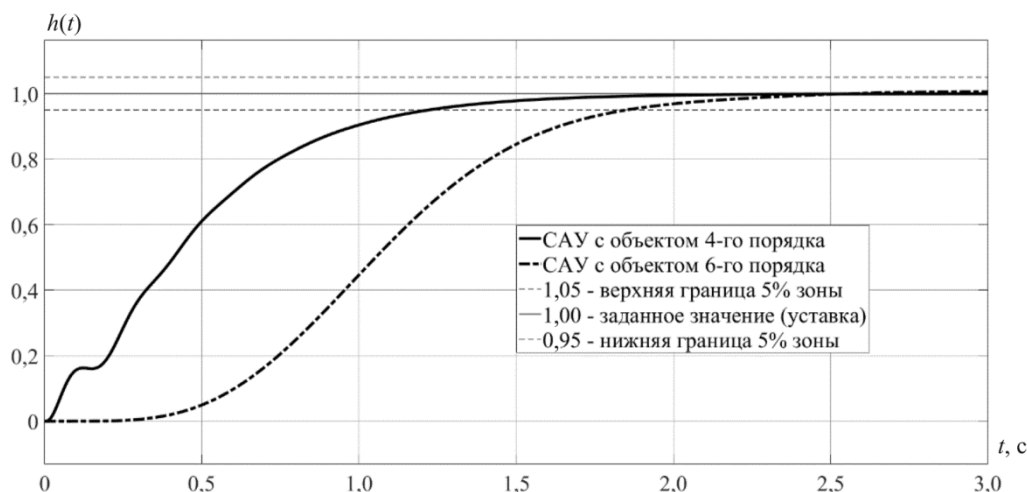


Рис. 4. Переходные характеристики цифровой САУ с объектами четвертого и шестого порядка

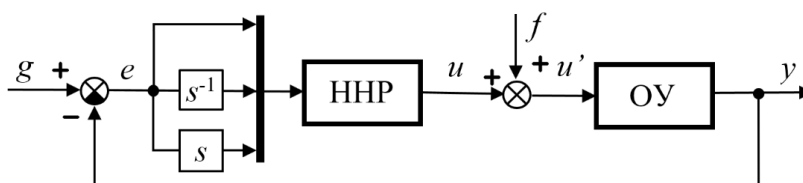


Рис. 5. Структурная схема САУ с нейро-нечетким ПИД-регулятором

Численное моделирование работы нейро-нечеткой системы вывода.

Моделирование проведено в программной среде MATLAB/Simulink. Создание нейро-нечеткого регуляторов для САУ с объектами четвертого и шестого порядков выполнено с использованием редактора *anfisedit*, который реализует создание моделей и обучение ННС, визуализирует их структуру. Набор данных разделен на обучающую и тестовую выборку в пропорции 70 и 30 % соответственно.

При генерации системы нечеткого вывода использован метод решетчатого разбиения (*Grid partition*). При выборе данного варианта метода задается количество термов для каждой входной переменной, тип ФП для входных переменных и выходного параметра (рис. 6, а). В данной модели ННС сформировано 27 правил. Переменные определялись треугольными и гауссовыми ФП.

Структура построенной нейро-нечеткой MISO-системы типа ANFIS (рис. 6, б) состоит из следующих элементов:

- три входных переменных: ошибка управления x_1 (E); интеграл ошибки x_2 (IE); производная ошибки x_3 (DE);
- выходной параметр – переменная управляющего сигнала y (U);
- три ФП треугольного вида (также рассмотрен вариант функции Гаусса) для каждой из входных переменных;
- двадцать семь продукционных правил нечеткого вывода по алгоритму TS.

Назначение слоев ННС типа ANFIS.

Первый слой обеспечивает процесс фазификации входных переменных, в нем определяются параметры ФП $\mu_r(x_i)$, $r = 1, 2, 3$, $i = 1, 2, 3$ при обучении сети: ФП в исследовании, для каждой переменной x_i и каждого правила r , описывается треугольной функцией (или функцией Гаусса).

Второй слой осуществляет агрегирование отдельных переменных x_i и определяет предпосылки каждого из 27 нечетких продукционных правил. Каждый узел этого слоя соответствует одному нечеткому правилу. Выходами узла является степень выполнения r -го нечеткого правила w_r , которая рассчитывается на основе алгебраического произведения:

$$w_r = \mu_r(X) = \prod_{i=1}^m \mu_r(x_i).$$

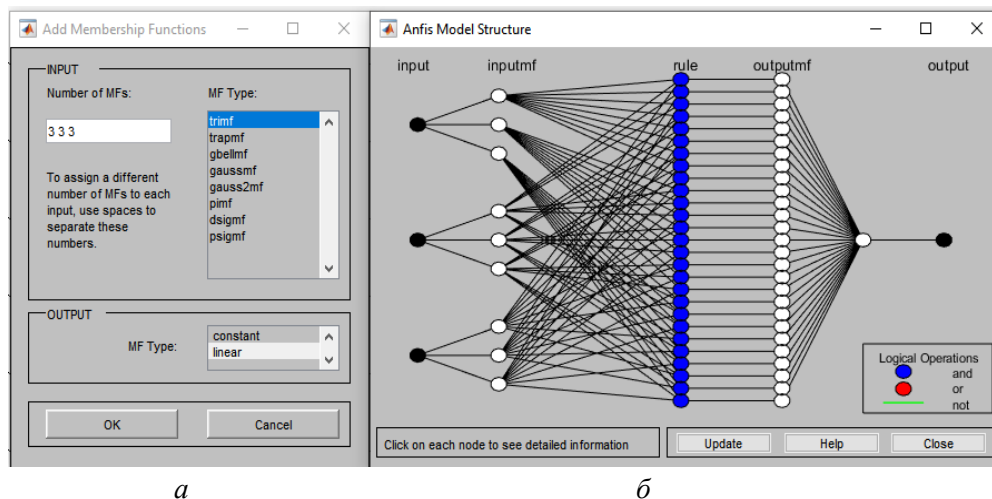


Рис. 6. Окна выбора количества и типа ФП (а) и структура ННС типа ANFIS (б)

Третий слой – нормализующий, в котором определяются относительные значения истинности посылок \bar{w}_r выполнения нечеткого правила r :

$$\bar{w}_r = w_r / \sum_{i=1}^N w_i.$$

Четвертый слой – параметрический, формирует заключения N нечетких продукционных правил модели TS, следующего вида:

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } \dots \text{ И } x_m = A_{m1}, \text{ ТО } f_1(X) &= p_{10} + \sum_{i=1}^m p_{1i} \cdot x_i; \\ &\dots \\ \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{1N} \text{ И } \dots \text{ И } x_m = A_{mN}, \text{ ТО } f_N(X) &= p_{N0} + \sum_{i=1}^m p_{Ni} \cdot x_i. \end{aligned}$$

В четвертом слое также производится умножение функций $f_r(X)$ на значения весовых коэффициентов \bar{w}_r , сформированных в предыдущем слое по формуле

$$y_r = \bar{w}_r \cdot f_r(X).$$

Пятый слой называется выходным, выполняет суммирование вкладов всех правил и формирует выходной сигнал модели \hat{y} :

$$\hat{y} = \sum_{r=1}^N y_r = \sum_{r=1}^N \left(p_{r0} + \sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot x_i \right) \cdot \frac{\prod_{i=1}^m \mu_r(x_i)}{\sum_{l=1}^N \prod_{i=1}^m \mu_l(x_i)}.$$

Обучение нейро-нечеткой сети типа ANFIS выполнялось на базе комбинированного метода, объединяющего метод обратного распространения ошибки и рекуррентный метод наименьших квадратов.

Оценка точности построения модели системы нечеткого вывода MISO-системы с использованием обучающих и проверочных данных проводилась на основе метрики – среднеквадратической ошибки $RMSE$ (Root Mean Square Error), которую определяли на обучающих и проверочных данных:

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

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

Итоговые результаты обучения нейро-нечеткой продукционной сети приведены в таблице. Наилучшая точность была получена при использовании треугольных функций принадлежности.

Результаты обучения нейро-нечеткой продукционной сети (*авторские результаты*)

Количество ФП входных переменных (три переменные)			Тип ФП входа	Тип ФП выхода	Число итераций	$RMSE$	
E	IE	DE				ОУ 4-го порядка	ОУ 6-го порядка
3	3	3	Треугольная	Линейная	10	$8,166 \cdot 10^{-7}$	$9,603 \cdot 10^{-13}$
3	3	3	Гауссова	Линейная	2	$1,474 \cdot 10^{-5}$	$1,243 \cdot 10^{-12}$

Вычислительным экспериментом в среде программы MATLAB/Simulink выполнено сравнение переходных характеристик $h(t)$ для систем автоматического управления с объектами четвертого (рис. 7) и шестого порядков (рис. 8).

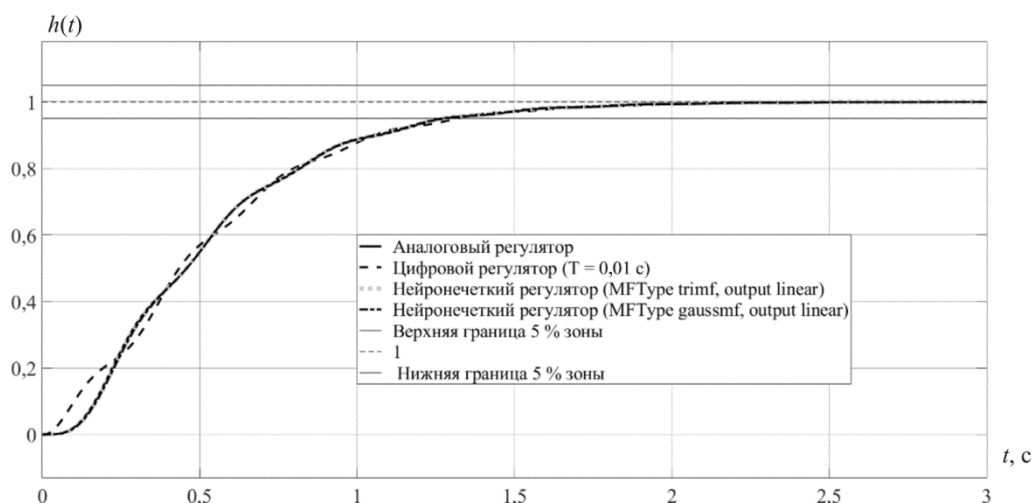


Рис. 7. Переходные характеристики САУ с объектом управления четвертого порядка при использовании аналогового, цифрового и нейро-нечетких регуляторов

В сравнительном анализе использованы аналоговый, цифровой и нейро-нечеткие регуляторы. Как видно из полученных кривых переходной характеристики, практически все соответствуют аperiodическому виду зависимости (см. рис. 7).

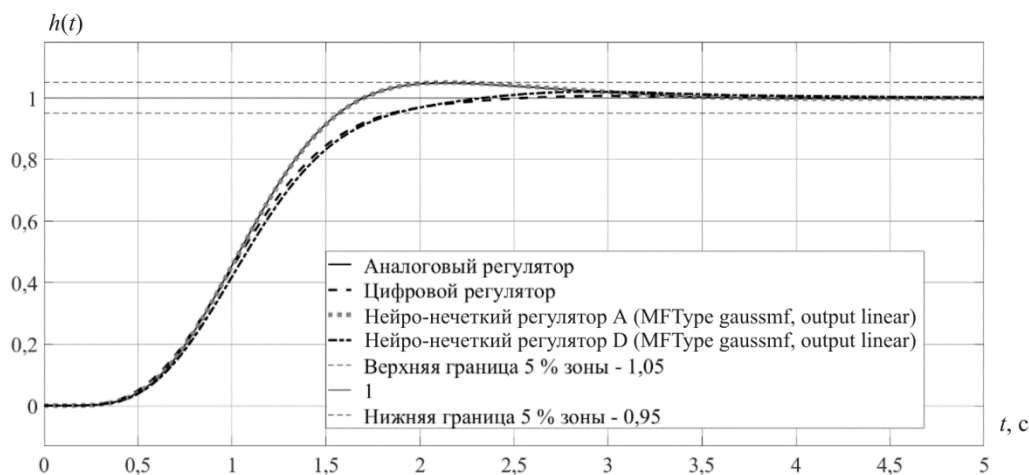


Рис. 8. Переходные характеристики САУ с объектом управления шестого порядка при использовании аналогового, цифрового и нейро-нечетких регуляторов

Все кривые, за исключением $h(t)$ САУ с цифровым регулятором, имеют отклонение меньше 1 %. Переходная характеристика САУ с цифровым регулятором имеет отклонение точек от эталона меньше 10 %, а при входе в пятипроцентную зону меньше 1 %. Прямые показатели качества всех кривых: без перерегулирования; время регулирования 1,3 с.

Переходные характеристики САУ с ОУ шестого порядка (см. рис. 8), соответствуют аperiodическому виду функции, имеют запаздывание 0,5 с. Кривые $h(t)$ САУ с аналоговым и нейро-нечетким А (синтезирован по данным аналоговой САУ) регуляторами имеют очень высокую корреляцию. Переходные характеристики САУ с цифровым и нейро-нечетким D (синтезирован по данным цифровой САУ) регуляторами имеют отклонения не более 1 %, а при входе в пятипроцентную зону – полное совпадение.

Прямые показатели качества переходных процессов САУ с:

- аналоговым и нейро-нечетким А-регуляторами – перерегулирование 5 %, время регулирования 1,55 с;
- цифровым и нейро-нечетким D-регуляторами – перерегулирование 2 %, время регулирования 1,8 с.

Результаты моделирования полученных вариантов синтезированных регуляторов удовлетворяют требованиям разработчика к системам автоматического управления плотностью АБ-смесей укладчиками. Подтверждено высокое качество управления и быстрое действие САУ с регуляторами, синтезированными на базе нейросетевого представления нечетких продукционных моделей. Подходы к синтезу регуляторов на базе нечетких нейронных моделей дополняют друг друга и позволяют устранить недостатки искусственных нейронных сетей:

- отсутствие общего способа построения искусственных нейронных сетей;
- экспериментальный подход, а также использование метода проб и ошибок для реализации алгоритма расчета количества слоев сети и количества нейронов в каждом слое;
- невозможность в явном виде интерпретировать функциональную зависимость между входными и выходными данными;
- значительно больше количество данных переменных для обучения сети.

Заключение

Рассмотрены задачи создания нейро-нечеткой системы управления уплотнением асфальтобетонных смесей укладчиками, включающей интеллектуальную систему автоматического

контроля уплотнения. Она предназначена для непрерывного визуального представления данных технологического процесса, полученных в результате измерений и вычислений. Автоматическое управление плотностью обеспечивается на базе нейро-нечеткого ПИД-регулятора с учетом выходных данных переменных интеллектуальной системы контроля плотности.

Новизна решаемых задач заключается в исследовании системы с объектами управления высокого порядка. Модели процессов уплотнения асфальтобетонных смесей укладчиками и вибрационными катками, а также методы параметрического синтеза ПИД-регуляторов для таких САУ получены в работах [16; 17]. Предложенные варианты системы нечеткого вывода для моделей MISO-систем с ОУ четвертого и шестого порядков по результатам моделирования в среде MATLAB обеспечивают требуемую достоверность и заданные прямые показатели качества рассмотренных моделей САУ. С учетом полученных в работе результатов определены направления дальнейших исследований в области анализа и синтеза параметров САК (САУ) с объектами высокого порядка, которые планируется решать на базе нечетких нейронных продукционных сетей.

Применение интеллектуальной системы в качестве советчика машиниста-укладчика позволяет повысить эффективность управления и, как следствие, сократить время принятия решений по управлению качеством уплотнения. Это способствует улучшению качества асфальтобетонных покрытий, увеличению срока их службы при эксплуатации и ресурсосбережению за счет увеличения производительности отряда дорожных машин и уменьшения используемых типов и количества дорожных катков.

Список литературы

1. Захаренко А.В., До С.Т., Чан В.Л. Рабочий орган асфальтоукладчика // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2013. – № 10 (81). – С. 157–161.
2. Захаренко А.В., Пермяков В.Б., Молокова Л.В. Дорожные катки: теория, расчет, применение: монография. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 328 с.
3. Böhmer P. Untersuchungen über die Verdichtung – Wirkung von Schwarzdeckenfertigung. Baumaschine und Bautechnik. – 1974. – № 7 – 8. – P. 233–238.
4. Леонович И.И., Буртыль Ю.В. Взаимозависимости ровности покрытия и прочности дорожной одежды // Строительная наука и техника. 2011. – № 1.
5. Костельов И.П., Пархоменко Д.В. Чем уплотнять асфальтобетон в покрытиях при смене его типа, состояния и толщины слоя // Дорожная техника 2007: каталог-справ. – СПб., 2007. – С. 70–85.
6. Костельов М.П., Первалов В.П., Пахаренко Д.В. До какого уровня (китайского, европейского или американского?) следует России поднимать качество строительства и сроки службы своих новых автомобильных дорог // Дорожная техника 2011: каталог-справ. – СПб.: ООО «Славутич», 2011. – С. 13–26.
7. Improving asphalt pavement intelligent compaction based on differentiated compaction curves / P. Polaczyk, W. Hu, H. Gong, X. Jia, B. Huang // Construction and Building Materials. – 2021. – P. 124125.
8. Костельов М.П. Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона // Дорожная техника 2009: каталог-справ. – СПб.: ООО «Славутич», 2009. – С. 42–52.
9. Новый метод нейросетевой системы контроля уплотнения асфальтобетонных смесей / А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов, Р.Т. Емельянов, В.И. Иванчура // Современная

наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2021. – № 9. – С. 65–69.

10. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками // Инженерный вестник Дона. 2021. – № 10.

11. К вопросу создания системы непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков / А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов // Программная инженерия. – Т. 12, № 8. – 2021. – С. 413–419.

12. Прокопьев А.П. Киберфизическая система для управления отрядом дорожных машин в инфраструктурных проектах автомобильного транспорта // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 8.

13. Data-Driven Platform Framework for Digital Whole-Process Expressway Construction Management / S.Y. Chen, J.X. Zhang, Q.C. Ni, M. Skitmore, P. Ballesteros-Pérez, Y.J. Ke, J. Zuo, H.J. Sun // *Front. Neurosci.* – 2022. – 16:891772. DOI: 10.3389/fnins.2022.891772

14. Piegat A. Fuzzy modeling and control // *Stud. Fuzziness Soft Comput.* – 2001. – 728 p. DOI: 10.1007/978-3-7908-1824-6

15. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system // *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics.* – 1993. – Vol. 23. – 3. – P. 665–684. DOI: 10.1109/21.256541

16. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Параметрический синтез системы управления для объектов высокого порядка // Журнал Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9, № 7. – С. 987–993.

17. Автоматизация неразрушающего контроля уплотнения дорожных материалов: монография / А.П. Прокопьев, Р.Т. Емельянов, В.И. Иванчура, Е.С. Турышева // Сиб. федер. ун-т. – Красноярск: СФУ, 2021. – 156 с.

References

1. Zaharenko A.V., Do S.T., Chan V.L. Rabochij organ asfal'toukladchika [The working body of the paver]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta.* 2013, no. 10, pp. 157-161.

2. Zaharenko A.V., Permjakov V.B., Molokova L.V. Dorozhnye katki: teorija, raschet, primenenie [Road rollers: theory, calculation, application]. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'». 2018, 328 p.

3. Böhmer P. Untersuchungen über die Verdichtung – Wirkung von Schwarzdeckenfertigung. *Baumaschine und Bautechnik.* 1974, no. 7-8, pp. 233-238.

4. Leonovich I.I., Burtyl' Ju.V. Vzaimozavisimosti rovnosti pokrytija i prochnosti dorozhnoj odezhdy [The interdependence of the evenness and the strength pavement]. *Stroitel'naja nauka i tehnika.* 2011, no. 1.

5. Kostel'ov I.P., Parhomenko D.V. Chem uplotnjat' asfal'tobeton v pokrytijah pri smene ego tipa, sostojanija i tolshhiny sloja [How to seal asphalt concrete in coatings when changing its type, condition and layer thickness]. *Dorozhnaja tehnika 2007: katalog-sprav.* SPb., 2007, pp. 70-85.

6. Kostel'ov M.P., Perevalov V.P., Paharenko D.V. Do kakogo urovnja (kitajskogo, evropejskogo ili amerikanskogo?) sleduet Rossii podnimat' kachestvo stroitel'stva i sroki sluzhby svoih novyh avtomobil'nyh dorog [To what level (Chinese, European or American?) should Russia raise the quality of construction and service life of its new highways]. *Dorozhnaja tehnika 2011: katalog-sprav.* SPb.: ООО «Slavutich», 2011, pp. 13-26.

7. Polaczyk P., Hu W., Gong H., Jia X., Huang B. Improving asphalt pavement intelligent compaction based on differentiated compaction curves. *Construction and Building Materials*. 2021, pp. 124125.
8. Kostel'ov M.P. Funkcional'nye dostoinstva i nedostatki vibrokatkov dlja uplotnenija asfal'tobetona [Functional advantages and disadvantages of vibratory rollers for compaction of asphalt concrete]. *Dorozhnaja tehnika 2009: katalog-sprav.* SPb.: OOO «Slavutich», 2009, pp. 42-52.
9. Prokop'ev A.P., Nabizhanov Zh.I., Emel'janov R.T., Ivanchura V.I. Novyj metod nejrosetevoj sistemy kontrolja uplotnenija asfal'tobetonnyh smesej [A new method of neural network system for monitoring of asphalt mixtures compaction]. *Sovremennaja nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Serija: Estestvennye i tehniczeskie nauki*, 2021, no. 9, pp. 65-69.
10. Prokop'ev A.P., Nabizhanov Zh.I. Nejrosetevaja sistema upravlenija processom uplotnenija dorozhnyh materialov asfal'toukladchikami [Neural network control system for compaction of road materials by pavers]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021, no. 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235.
11. Prokopev A. P., Nabizhanov Zh. I., Ivanchura V. I., Emelyanov R. T. On the Issue of Designing a System for Continuous Control of Road Materials Compaction for Pavers. *Programmynaya Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 8, pp. 413-419.
12. Prokop'ev A.P. Kiberfizicheskaja sistema dlja upravlenija otrjadom dorozhnyh mashin v infrastrukturyh proektah avtomobil'nogo transporta [Cyberphysical system for managing a squad of road vehicles in infrastructure projects of road transport]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2022, no. 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7848.
13. Chen S.Y., Zhang J.X., Ni Q.C., Skitmore M., Ballesteros-Pérez P., Ke Y.J., Zuo J., Sun H.J. Data-Driven Platform Framework for Digital Whole-Process Expressway Construction Management. *Front. Neurosci.* 2022, pp. 16:891772. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.891772>.
14. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Springer-Verlag, 2001, 728 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
15. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system // *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. 1993, vol. 23, no. 3, pp. 665-684. DOI: 10.1109/21.256541.
16. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T. Parametric synthesis of control systems for objects of high order. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2016, vol. 9, no. 7, pp. 987-993. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-987-993.
17. Prokop'ev A.P., Emel'janov R.T., Ivanchura V.I., Turysheva E.S. Avtomatizacija nerazrushajushhego kontrolja uplotnenija dorozhnyh materialov [Automation of non-destructive testing of road materials compaction]. Krasnojarsk, Sibirskij federal'nyj universitet, 2021, 156 p.