

Прокопьев, А. П. Нейро-нечеткая система непрерывного контроля плотности асфальтобетонных смесей / А. П. Прокопьев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2023. – № 3. – С. 84–94. DOI 10.15593/2499-9873/2023.3.06

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Прокопьев, А. П. Нейро-нечеткая система непрерывного контроля плотности асфальтобетонных смесей / А. П. Прокопьев. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2023.3.06 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2023. – № 3. – С. 84–94.



**ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ**

№ 3, 2023

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



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.06

УДК 004.896:69.002.5



Нейро-нечеткая система непрерывного контроля плотности асфальтобетонных смесей

А.П. Прокопьев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 24 декабря 2022

Одобрена: 05 июля 2023

Принята к публикации:

18 сентября 2023

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора

100 %.

Ключевые слова:

нейро-нечеткая система, ANFIS, гибридный метод обучения, RMSE, функция принадлежности, асфальтоукладчик, асфальтобетонная смесь, система непрерывного контроля плотности.

АННОТАЦИЯ

Повышение качества и увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог является народно-хозяйственной проблемой, которая решается за счет мероприятий, связанных с совершенствованием нормативной базы, улучшением свойств дорожных материалов, автоматизацией контроля и управления процессами уплотнения. Существующие автоматизированные системы контроля и управления плотностью дорожными катками базируются на методах искусственного интеллекта. Особенностью строительства верхних слоев асфальтобетонных дорожных покрытий в Российской Федерации является значительное влияние на их качество результатов работы асфальтоукладчиков, обеспечивающих несколько технологических операций – приемку, укладку и уплотнение асфальтобетонных смесей. Применение системы автоматического контроля плотности асфальтобетонных смесей в процессе их укладки позволит устранить многие дефекты дорожных покрытий во время их эксплуатации.

Целью работы является построение системы непрерывного контроля плотности в процессе укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей укладчиками на основе методов искусственного интеллекта.

Представлены результаты разработки новой системы интеллектуального контроля плотности асфальтобетонной смеси укладчиками. Предложено использовать структуру нейро-нечеткой сети типа ANFIS. Обучение нейро-нечеткой системы типа ANFIS выполнено на основе комбинации методов наименьших квадратов и убывающего градиента по массиву переменных, полученных на основе результатов экспериментальных исследований, выполненных ВНИИСтройдормаш, Союз ДорНИИ, МАДИ. Автоматизация контроля плотности направлена на улучшение качества асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

© ПНИПУ

© Прокопьев Андрей Петрович – кандидат технических 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. Neuro-fuzzy system of continuous control of density asphalt concrete mixtures. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2023, no. 3, pp. 84–94. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.06

MDPI and ACS Style: Prokopev, A.P. Neuro-fuzzy system of continuous control of density asphalt concrete mixtures. *Appl. Math. Control Sci.* **2023**, 3, 84–94. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.3.06>

Chicago/Turabian Style: Prokopev, Andrey P. 2023. “Neuro-fuzzy system of continuous control of density asphalt concrete mixtures”. *Appl. Math. Control Sci.* no. 3: 84–94. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.3.06>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES

№ 3, 2023

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



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.06

UDC 004.896:69.002.5



Neuro-fuzzy system of continuous control of density asphalt concrete mixtures

A.P. Prokopev

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 December 2022

Approved: 05 July 2023

Accepted for publication:
18 September 2023

Funding

This research received
no external funding.

Conflicts of Interest

The author declares no conflict
of interest.

Author Contributions

100 %.

Keywords:

neuro-fuzzy system, ANFIS, hybrid
training method, RMSE, accessory
function, asphalt paver, asphalt
concrete mixture, continuous densi-
ty control system.

ABSTRACT

Improving the quality and increasing the service life of asphalt concrete pavements of roads is a national economic problem, which is solved through measures related to improving the regulatory framework, improving the properties of road materials, automating its control and management of the compaction process. Existing automated systems for monitoring and controlling the density of road rollers are based on artificial intelligence methods. A feature of the construction of the upper layers of asphalt concrete road surfaces in the Russian Federation is a significant impact on their quality of the results of the work of asphalt pavers, which provide several technological operations – acceptance, laying and compaction of asphalt concrete mixtures. The use of an automatic density control system for asphalt concrete mixtures in the process of laying them will eliminate many defects in road surfaces during their operation.

The aim of the work is to build a system of continuous density control in the process of laying and compacting asphalt concrete mixtures by pavers based on artificial intelligence methods.

The article presents the results of the development of a new system for intelligent control of the density of the asphalt concrete mixture by pavers. It is proposed to use the structure of a neuro-fuzzy network of the ANFIS type. Training of a neuro-fuzzy system of the ANFIS type was performed on the basis of a combination of methods of least squares and a decreasing gradient on an array of variables obtained on the basis of the results of experimental studies performed by VNIISroydormash, SoyuzDorNII, MADI. Automation of density control is aimed at improving the quality of asphalt concrete pavements of roads.

© PNRPU

© **Andrey P. Prokopev** – CSc of 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 долговечности покрытий автомобильных дорог является народно-хозяйственной задачей, для решения которой требуется создание и усовершенствование методов и средств управления процессами уплотнения дорожных материалов. Эта задача может эффективно решаться за счет создания систем автоматического контроля (САК) и управления процессом уплотнения асфальтобетонных (АБ) смесей [1–3].

В работе [4] рассмотрены особенности создания киберфизических (КФС) дорожно-строительных систем. Дорожные машины являются важными частями КФС, которые обеспечивают реализацию технологических процессов при строительстве инфраструктурных объектов автомобильных дорог. Автором предложена структурно-функциональная схема автоматизированной системы контроля и управления процессами уплотнения асфальтобетонных смесей (АБ-смесей), взаимодействующими в режиме реального времени между собой машинами дорожного отряда (асфальтоукладчик – вибрационные катки) в процессе строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [4].

Экспериментальные исследования уплотняющей способности асфальтоукладчиков позволили ученым получить данные, доказывающие высокую эффективность уплотнения в процессе укладки горячих АБ-смесей и возможности обеспечить нормативные показатели их плотности [5]. Для обеспечения заданного уровня качества дорожных покрытий автомобильных дорог актуально применение во время строительства на асфальтоукладчиках систем непрерывного контроля плотности и автоматического управления процессом уплотнения. Разработка приборов-плотномеров, предназначенных для установки на асфальтоукладчики и позволяющих определять плотность уплотняемого слоя АБ-смеси в режиме реального времени, является актуальной научной задачей, а также способствует внедрению КФС.

Методы

В работе предложена идея интеллектуализации контроля плотности АБ-смесей для повышения эффективности управления (ручного и автоматического) процессом уплотнения и обеспечения с учетом заданных параметров производства работ значений показателей качества.

Целью работы является создание интеллектуальной системы автоматического контроля плотности, предназначенной для определения в режиме реального времени плотности АБ-смеси (формирование информации о качестве уплотнения и рекомендаций для машиниста).

Асфальтобетонная смесь деформируется рабочим органом с трамбуемым брусом, совершающим колебательное движение (процесс завершается за 4÷6 ударов), вибрационной плитой, прессующими планками. Вибрационная плита, находясь в постоянном контакте с поверхностью, обеспечивает улучшение структуры уплотняемого слоя и удерживает 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.

Вопросам создания системы автоматического контроля качества уплотнения АБ-смесей на базе нейросетевых структур посвящены работы [6–8]. По данным этих исследований модель системы автоматического контроля плотности можно представить в следующем виде:

$$G_{mb} = \theta(\text{Type}, V, f_t, f_s, F_t),$$

где $Type$ – идентификатор типа АБ-смеси; V – скорость движения асфальтоукладчика, м/мин; f_t – частота колебаний трамбуемого бруса, Гц; f_s – частота колебаний вибрационной плиты, Гц; F_t – максимальное усилие в толкателе трамбуемого бруса, Н.

Обоснование переменных данных для построения интеллектуальной САК уплотнения выполнено на основе статистического анализа переменных данных рабочего процесса и анализа технологического процесса асфальтоукладчика.

Приняты обозначения для анализа: $Type - X_1$; $V - X_2$; $f_t - X_3$; $f_s - X_4$; $F_t - X_5$; $G_{mb} - Y$. Определены коэффициенты парной корреляции R переменных X_1, \dots, X_5 связи с Y и между ними (табл. 1).

Таблица 1

Матрица коэффициентов парной корреляции (авторские результаты)

Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
1	-0,682	0,066	0,525	-0,519	0,831	Y
	1	-0,091	-0,124	0,243	-0,451	X_1
		1	0,127	-0,115	-0,118	X_2
			1	-0,230	0,552	X_3
				1	-0,563	X_4
					1	X_5

Анализируя данные матрицы коэффициентов парной корреляции, можно установить, что больше всего связана с показателем уплотнения Y переменная X_5 . У переменных X_1, X_3, X_4 ($R = 0,682; 0,525; -0,519$) коэффициенты парной корреляции показывают заметную связь (по шкале Чеддока) с переменной Y , но среди них более тесная связь с Y наблюдается у переменной X_1 ($R = 0,682$). Переменную X_2 (скорость движения укладчика) можно исключить из рассмотрения, так как она показала очень слабую связь ($R = 0,066$) с Y . Переменные X_1, X_3, X_4 ($R = -0,451; 0,552; -0,563$) можно исключить из рассмотрения, так как наблюдается умеренная и заметная связь (по шкале Чеддока) с переменной X_5 . Переменная, удовлетворяющая требованиям исходных данных для обучения нейро-нечеткой системы, – X_5 (усилие трамбуемого бруса).

Анализ переменных данных на основе технологического процесса асфальтоукладчиков проведен по переменным: $Type - X_1$; $V - X_2$; $f_t - X_3$; $f_s - X_4$; $F_t - X_5$.

Переменная $Type - X_1$, характеризует тип АБ-смеси: тип А – идентификатор 1; тип Б – 2; тип В – 3; тип Г – 4; тип Д – 5. При строительстве АБ-дорожных покрытий используется АБ-смесь одного типа. При контроле плотности АБ-смеси эта переменная не изменяется.

Переменная $V - X_2$, скорость движения асфальтоукладчика, может изменяться в процессе укладки АБ-смеси. Но эта переменная не может варьироваться в широком диапазоне, так как она определяется на этапе проекта производства работ и имеет прямо пропорциональную зависимость со скоростью дорожно-строительного потока, подачей горячей асфальтобетонной смеси автосамосвалами. Переменную V некорректно использовать при контроле плотности АБ-смесей одного типа в процессе укладки, так как она характеризуется как константа.

Переменная $f_t - X_3$, частота колебания трамбуемого бруса изменяется оператором в процессе уплотнения слоя АБ-смеси в зависимости от заданных параметров качества. Эта переменная имеет важное значение для регулирования плотности, так как от числа воздействий трамбуемым брусом зависят результаты уплотнения АБ-смеси.

Переменная $f_s - X_4$, частота колебаний вибрационной плиты, может изменяться оператором с учетом рекомендаций производителя в зависимости от назначенной частоты трамбуемого бруса.

Переменная $F_t - X_5$, усилие в толкателе трамбуемого бруса, среди рассмотренных переменных имеет более сильную зависимость от изменения плотности АБ смесей разных типов. Результаты экспериментальных исследований укладчика с эффективным рабочим органом (два трамбуемых бруса, выглаживающая плита) в реальных условиях дорожного строительства [8–10] позволяют сделать вывод о наличии зависимости коэффициента уплотнения от максимального усилия в толкателе трамбуемого бруса. Возрастание сопротивления смеси уплотнению происходит постепенно и достигает максимальных значений после $4 \div 5$ воздействий на смесь трамбуемым брусом. Исследования проводились при скоростях укладчика 1,6; 3,2; 4,8 м/мин, частотах вращения эксцентрикового вала от 1100 до 1700 мин⁻¹. Усилие в толкателях (максимальные значения) измерялось тензодатчиками. Величина усилий в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси типа Б с толщиной слоя 0,05 м изменялась от 10 кН (коэффициент уплотнения $K_y = 0,92$) до 23 кН ($K_y = 0,99$) [8–10].

Проведенный статистический анализ и анализ технологического процесса позволил обосновать для использования при разработке интеллектуальной системы автоматического контроля плотности одной входной переменной F_t – усилие в толкателе трамбуемого бруса.

Предложен вариант функциональной схемы САК плотности АБ-смесей укладчиками, реализующей новый метод на основе переменных данных выходного сигнала y_1 – усилия трамбуемого бруса (рис. 1).

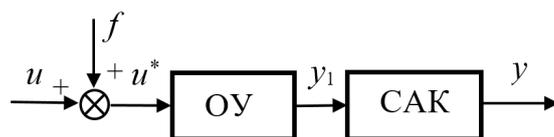


Рис. 1. Функциональная схема системы непрерывного контроля плотности:

u – регулирующий параметр, 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 укладчика; y_1 – переменная на входе САК – максимальное усилие в толкателе трамбуемого бруса

Объектом управления является процесс взаимодействия уплотняющего рабочего органа укладчика (трамбуемый брус – вибрационная плита) и асфальтобетонной смеси.

Для разработки интеллектуальной системы контроля плотности предложено использовать нечеткие нейронные (НН) сети. Они могут быть реализованы для систем типа «один вход – один выход» (single input – single output – SISO) и «много входов – один выход» (multi input – single output – MISO). Для исследования принята структура адаптивной НН системы типа ANFIS (адаптивная сетевая нечеткая система вывода – Adaptive – Network – Based Fuzzy Inference Systems) [11]. ANFIS представляет собой структуру пятислойной нейронной сети прямого действия с нечеткой моделью вывода типа Такаги – Сугено (ТС).

Рассмотрена задача синтеза интеллектуальной САК плотности на базе создания нейро-нечеткой SISO-системы, имеющей одну входную и одну выходную переменные, заданные для сравнительного анализа треугольной и гауссовой функциями принадлежности (ФП).

Алгоритм синтеза модели нейро-нечеткой САК плотности.

Шаг 1. Подготовка набора переменных данных на основе результатов экспериментальных исследований, выполненных в ВНИИСтройдормаш, СоюзДорНИИ, МАДИ.

Шаг 2. Определение структуры нейро-нечеткой САК плотности.

Шаг 3. Запуск ANFIS-редактора в среде программы MATLAB.

Шаг 4. Загрузка файла обучающей выборки *.dat.

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

Шаг 6. Обучение НН-сети типа ANFIS.

Шаг 7. Тестирование нечеткой сети.

Шаг 8. Сохранение разработанной системы под названием *.fis.

Шаг 9. Моделирование. Анализ результатов процесса модели интеллектуальной САК.

Результаты

Для создания нейро-нечеткой SISO-системы в программе MATLAB использован редактор anfisedit. Набор переменных данных подготовлен для процесса уплотнения АБ-смеси типа Б и разделен на обучающую и тестовую выборку в пропорции 70 и 30 % соответственно. Выборки оформлены в виде файлов с расширением *.dat. В файле данные представлены в форме столбцов, правый столбец – выходная переменная, коэффициент уплотнения K_y асфальтобетонной смеси. Фрагмент обучающей выборки переменных данных приведен в табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент обучающей выборки переменных данных (авторские результаты)

F_t , кН	7,00	7,60	10,10	7,20	7,70	10,60	9,9	12,65
K_y	0,80	0,87	0,93	0,84	0,84	0,92	0,90	0,93

Генерирование нечетких правил выполнено на основе метода решетчатого разбиения (Grid partition), алгоритм которого предусматривает равномерное распределение ФП нечетких термов внутри диапазона изменения данных. Структура НН-сети на основе метода решетчатого разбиения приведена на рис. 2. В данной модели системой сформировано семь правил нечеткого вывода по алгоритму ТС. Переменные определялись треугольными и гауссовыми ФП.

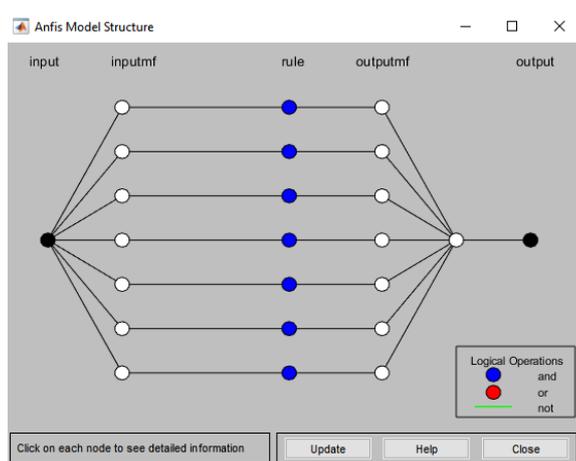


Рис. 2. Структура нейро-нечеткой сети на основе метода решетчатого разбиения

Структура построенной нейро-нечеткой SISO-системы типа ANFIS состоит из следующих элементов (рис. 2):

- одна входная переменная: усилие трамбуемого бруса $y_1 (F_t)$;
- выходной параметр – показатель качества уплотнения $y (K_y)$;
- семь ФП треугольного вида (также рассмотрен вариант функции гаусса) для входной переменной;
- семь продукционных правил нечеткого вывода по алгоритму ТС.

Результаты обучения НН-системы на основе гауссовой ФП представлены на рис. 3. Обучение закончилось через 90 эпох.

База продукционных правил показана на рис. 4.

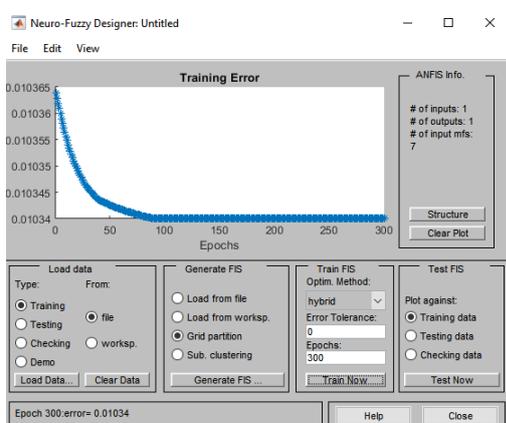


Рис. 3. Процесс обучения НН-системы гибридным методом

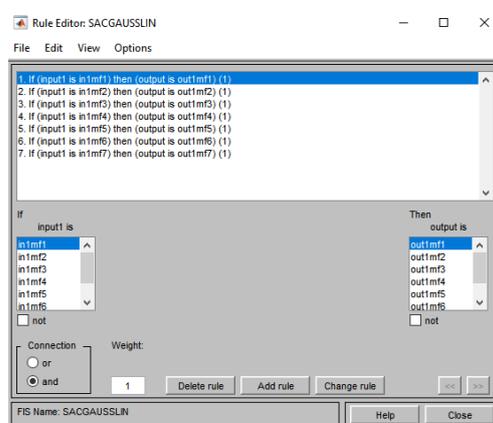


Рис. 4. Окно продукционных правил системы нечеткого вывода

Обучение нейро-нечеткой сети типа ANFIS выполнялось гибридным методом на базе метода обратного распространения ошибки и метода наименьших квадратов.

Оценка точности построения модели системы нечеткого вывода SISO-системы с использованием обучающих и проверочных данных проводилась на основе метрики – среднеквадратической ошибки (Root Mean Square Error – *RMSE*), 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 модели НН-системы приведены в табл. 3. Наилучшая точность была получена при использовании гауссовой функций принадлежности.

Таблица 3

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

Количество ФП входных переменных (одна переменная)	Тип ФП входа	Тип ФП выхода	Число итераций	<i>RMSE</i>
F_t				
7	Треугольная	Линейная	35	0,01056
7	Гауссова	Линейная	90	0,01034

Результаты построения графика зависимости выходной переменной от усилия трамбующего бруса представлены на рис. 5.

Гауссова функция принадлежности входной лингвистической переменной в окне редактора приведена на рис. 6.

Построенная структура НН-сети и метода нечеткого вывода (Сугено) приведена на рис. 7.

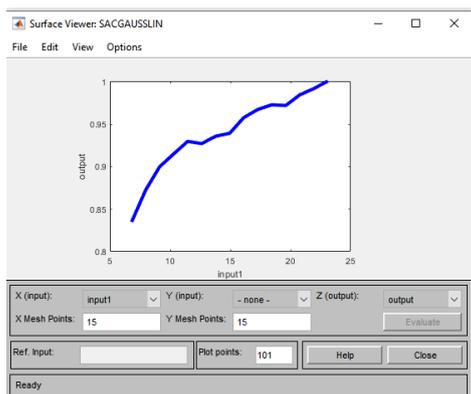


Рис. 5. Зависимость K_y от усилия трамбующего бруса

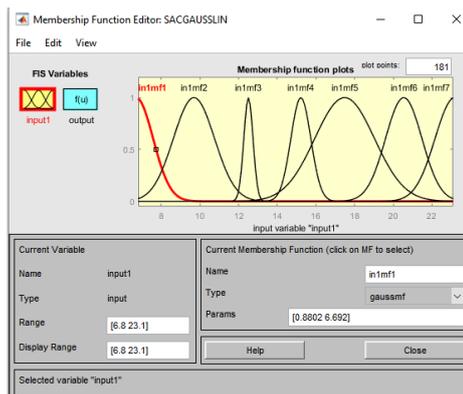


Рис. 6. Окно редактора функций принадлежности

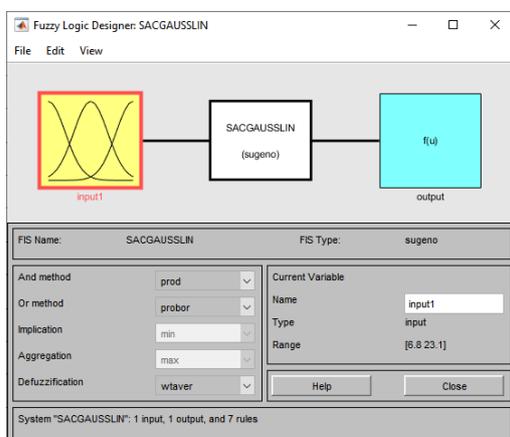


Рис. 7. Структура НН-системы с нечеткой моделью вывода типа Такаги – Сугено

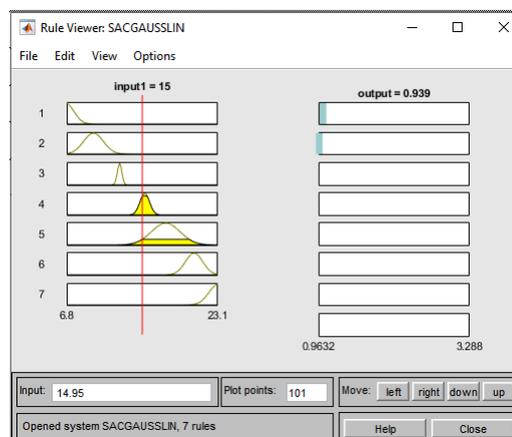


Рис. 8. Окно просмотра правил

Проверка модели на адекватность и ее работа в среде MATLAB выполняется в окне Rule Viewer (рис. 8), где можно задать значения исходных данных и автоматически получить результат выходной переменной. На рис. 8 для входных данных $F_t = 15$ кН получено значение $K_y = 0,939$, которое отличается от заданного $0,945$ на величину $0,006$ (т.е. меньше 1%), что указывает на достаточную адекватность модели НН-сети.

Одной из особенностей нейро-нечетких систем является ее ограничения в исследованных диапазонах параметров. Для расширения этих диапазонов необходимо обучение по приведенной в настоящей работе методике. Обучаемость НН-систем является значительным достоинством для обоснованного выбора при проектировании интеллектуальных систем контроля качества и систем управления на базе методов искусственного интеллекта.

Моделирование рабочего процесса нейро-нечеткой САК плотности.

Вычислительным экспериментом в среде программы MATLAB/Simulink выполнено моделирование рабочего процесса САК с заданием разных значений плотности АБ-смеси, рис. 9.

В результате моделирования получены графики временных зависимостей входного сигнала – усилия трамбующего бруса $F_t = f(t)$ и выходного – коэффициента уплотнения $K_y = f(t)$, рис. 10.

Результаты моделирования варианта синтезированной нейро-нечеткой САК плотности асфальтоукладчиками удовлетворяют требованиям разработчика к такой системе. Она обеспечивает высокую точность прогнозирования показателя плотности в режиме реального времени, погрешность составляет не более 2% .

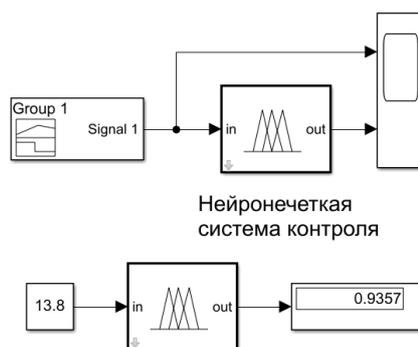


Рис. 9. Имитационная модель системы автоматического контроля плотности

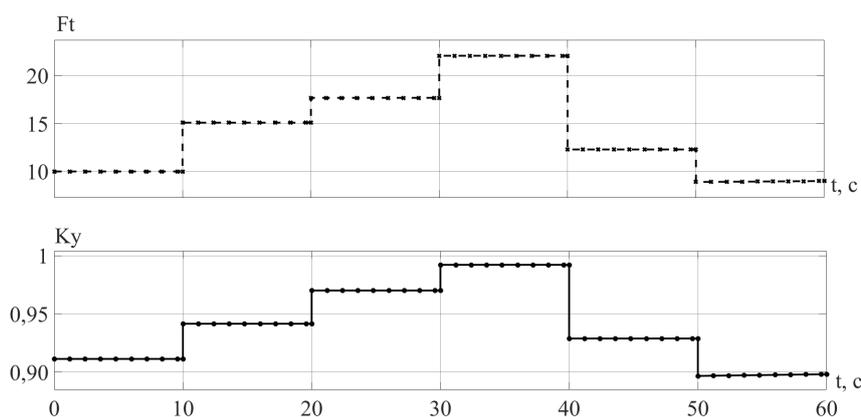


Рис. 10. Графики изменения усилия трамбующего бруса (входная переменная НН-системы) и коэффициента уплотнения (выходная переменная НН-системы)

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

Заключение

В статье рассмотрена задача построения нейро-нечеткой системы контроля плотности асфальтобетонных смесей укладчиками. Она предназначена для непрерывного расчета показателя плотности АБ-смеси на базе нейро-нечеткой системы и визуального представления данных технологического процесса. Повышение эффективности управления качеством уплотнения обеспечивается контролем плотности АБ-смеси и оперативной корректировкой режимных параметров уплотнения асфальтоукладчиком.

Новизна решаемых задач заключается в исследовании новой системы контроля для применения на асфальтоукладчиках. Предложенный вариант системы нечеткого вывода для модели SISO-системы по результатам моделирования в среде MATLAB обеспечивает требуемую достоверность результата прогнозирования плотности АБ-смесей. С учетом полученных в работе результатов определены направления дальнейших исследований в области анализа и синтеза параметров САК (САУ), которые планируется решать на базе методов искусственного интеллекта.

Применение интеллектуальной системы позволяет повысить эффективность управления и, как следствие, сократить время принятия решений по управлению качеством уплотнения асфальтобетонных смесей. Это способствует улучшению качества асфальтобетонных покрытий, увеличению срока их службы при эксплуатации и ресурсосбережению за

счет возрастания производительности отряда дорожных машин и уменьшения используемых типов и количества дорожных катков.

Список литературы

1. Насонов Е.И., Макиша Е.В. Киберфизические системы в строительной отрасли // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1.
2. 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.
3. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 10.
4. Прокопьев А.П. Киберфизическая система для управления отрядом дорожных машин в инфраструктурных проектах автомобильного транспорта // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 8.
5. Böhmer P. Untersuchungen über die Verdichtung – Wirkung von Schwarzdeckenfertigung. *Vaumaschine und Bautechnik*. – 1974. – № 7 – 8. – P. 233–238.
6. 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.
7. 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. – Том 12. – № 8. – 2021. – С. 413–419.
8. Concept of a new method for continuous non-destructive control of asphalt road pavements compaction / A.P. Prokopen, Zh.I. Nabizhanov, R.T. Emelyanov, V.I. Ivanchura // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – 1515. – P. 052054.
9. Исследование режимов уплотнения рабочими органами асфальтоукладчиков и разработка высокоэффективного уплотняющего оборудования: отчет о НИР, № ГР0189008506 / руководитель Г.В. Кустарев; МАДИ. – М., 1990. – 105 с.
10. Прокопьев А.П. Оптимизация параметров уплотняющего оборудования асфальтоукладчика с качающимися брусьями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / МАДИ. – М., 1991. – 19 с.
11. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system // *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*. – 1993. – Vol. 23, № 3. – P. 665–684.

References

1. Nasonov E.I., Makisha E.V. Kiberfizicheskie sistemy v stroitel'noj otrasli [Cyber-physical systems in the construction industry]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2019, no. 1. URL: ivdon.ru/rumagazine/archive/n1y2019/5678.
2. 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.
3. Prokop'ev A.P., Nabizhanov Zh.I. Nejrosetevaja sistema upravlenija processom uplotnenija dorozhnyh materialov asfal'toukladchikami [Neural network control system for com-

paction of road materials by pavers]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021, no. 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235.

4. 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.

5. Böhmer P. Untersuchunger uber die Verdichtung – swirkung von Schwarzdecken–fertigm. *Baumaschine und Bautechnik*. 1974, no. 7 - 8, pp. 233 - 238.

6. 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 tehnicheckie nauki*, 2021, no. 9, pp. 65 - 69.

7. Prokop'ev A.P., Nabizhanov Zh.I., Ivanchura V.I., Emel'janov R.T. K voprosu sozdaniya sistemy nepreryvnogo kontrolya uplotneniya dorozhnyh materialov dlya asfal'toukladchikov [On the Issue of Designing a System for Continuous Control of Road Materials Compaction for Pavers]. *Programmnyaya inzheneriya*, 2021, vol. 12, no. 8, pp. 413 - 419.

8. Prokopev A.P., Nabizhanov Zh.I., Emel'yanov R.T., Ivanchura V.I. Concept of a new method for continuous non-destructive control of asphalt road pavements compaction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1515, 052054.

9. Issledovanie rezhimov uplotneniya rabochimi organami asfal'toukladchikov i razrabotka vysokoeffektivnogo uplotnyayushchego oborudovaniya [Investigation of compaction modes by the working bodies of asphalt pavers and development of highly efficient sealing equipment]: otchet o NIR, № GR0189008506. Rukovoditel' G.V. Kustarev; MADI, M., 1990, 105 p.

10. Prokop'ev A.P. Optimizaciya parametrov uplotnyayushchego oborudovaniya asfal'toukladchika s kachayushchimisya brus'yami [Optimization of the parameters of the compacting equipment of the asphalt paver with tamper bars]: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.04. MADI. Moskva, 1991, 19 p.

11. 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.