

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-229-252
УДК 681.5



УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ СВОДООБРУШЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

*А.А. Воробьев, А.А. Мигров, И.Ю. Романова,
С.С. Евтюков, О.В. Москвичев*

Состояние вопроса. В настоящей статье представлен состав и алгоритм работы системы автоматизированного управления параметрами пневматической сводообрушающей системы, устанавливаемой на бункеры с сыпучими материалами. Актуальность и практическое значение рассматриваемого в статье вопроса определяется тем, что при выгрузке сыпучего материала из бункера могут возникнуть различные нарушения технологического процесса, проявляющиеся в образовании зависаний материала внутри емкости, уменьшении количества выгружаемого материала, сегрегации, вплоть до полной остановки выгрузки из-за образования сводов.

Материалы и/или методы исследования. Используются методы математического моделирования, системного анализа, сопоставления, теории систем, а также архитектура и математическая модель рекуррентной нейронной сети с обратной связью.

Результаты. Обоснован состав входных и выходных параметров системы управления. Рассмотрены методы решения задач классификации наборов параметров и выбрана искусственная рекуррентная нейронная сеть с обратной связью и с сигмоидальной функцией активации нейронов скрытого слоя и линейной функцией активации выходного слоя.

Заключение. В статье проведен анализ требований к системе автоматизированного управления параметрами работы пневматической сводообрушающей системы. На основании анализа возмож-

ных состояний системы, обоснован состав элементов системы и наборы входных, промежуточных и выходных параметров системы, а также целевая функция работы системы. Показано, что система может быть построена на основе искусственной нейронной сети. Разработан алгоритм системы автоматизированного управления параметрами работы пневматической сводообрушающей системы.

Ключевые слова: бункер; сыпучие материалы; пневматическая сводообрушающая система; сводообразование, система автоматического управления; искусственная нейронная сеть; обучение нейронной сети

Для цитирования. Воробьев А.А., Мигров А.А., Романова И.Ю., Евтюков С.С., Москвичев О.В. Управление системой сводообрушения сыпучих материалов на основе нейронной сети // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 1. С. 229-252. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-229-252

MANAGEMENT OF THE VAULTING SYSTEM BULK MATERIALS BASED ON A NEURAL NETWORK

*A.A. Vorobyov, A.A. Migrov, I.Yu. Romanova,
S.S. Evtukov, O.V. Moskvichev*

Background. This article presents the composition and algorithm of the automated control system for the parameters of a pneumatic arch-breaking system installed on bunkers with bulk materials. The relevance and practical significance of the issue considered in the article is determined by the fact that when unloading bulk material from the hopper, various violations of the technological process may occur, manifested in the formation of material freezes inside the container, a decrease in the amount of unloaded material, segregation, up to a complete stop of unloading due to the formation of arches.

Materials and/or methods. Methods of mathematical modeling, system analysis, comparison, systems theory, as well as architecture

and mathematical model of a recurrent neural network with feedback are used.

Results. *The composition of input and output parameters of the control system is substantiated. Methods for solving problems of classifying parameter sets are considered and an artificial recurrent neural network with feedback and with a sigmoidal activation function of neurons of the hidden layer and a linear activation function of the output layer is selected.*

Conclusion. *The article analyzes the requirements for the system of automated control of the parameters of the pneumatic arch-breaking system. Based on the analysis of possible states of the system, the composition of the system elements and the sets of input, intermediate and output parameters of the system, as well as the objective function of the system operation, are substantiated. It is shown that the system can be built on the basis of an artificial neural network. The algorithm of the automated control system for the parameters of the pneumatic arch-breaking system has been developed.*

Keywords: *bunker; bulk materials; pneumatic vault-breaking system; vault formation, automatic control system; artificial neural network; neural network training*

For citation. *Vorobyov A.A., Migrov A.A., Romanova I.Yu., Evtuykov S.S., Moskvichev O.V. Management of the Vaulting System Bulk Materials Based on a Neural Network // International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 229-252. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-229-252*

Введение

При производстве погрузочно-разгрузочных работ на промышленных предприятиях и на предприятиях железнодорожного транспорта приходится иметь дело с большим количеством сыпучих материалов. Большинство транспортно-складских систем, работающих сегодня на Российских железных дорогах, выполняют операции по переработке и перемещению таких материалов .

Об особенностях организации логистического управления подобными системами говорится в работах [1-5]. Вопросы рационального развития и управления транспортно-складскими системами на железнодорожном транспорте изучаются в работах [6-12]. В работах [13-15] изучаются экономическая составляющая изменения и переориентации логистических цепей, в том числе – с применением цифровых технологий. Однако, в большинстве рассмотренных исследований не решается целый ряд взаимосвязанных вопросов, связанных с технико-технологическим автоматизированным управлением параметрами бункерных установок при работе с сыпучими материалами.

Вместе с тем, все погрузочно-разгрузочные работы с сыпучими материалами сегодня осуществляются с помощью ряда погрузочно-разгрузочных устройств и механизмов, где в качестве основных или промежуточных звеньев применяются бункерные установки.

Актуальность данного исследования определяется также и тем, что при выгрузке материала из бункера могут возникнуть различные нарушения технологического процесса, проявляющиеся в образовании завесаний материала внутри емкости, уменьшении количества выгружаемого материала, сегрегации, а иногда и полной остановки выгрузки из-за образования сводов. Зависание – это застревание сыпучего материала в полости емкости хранения. Различают зависание материала на стенках или на днище бункера (когда внешнее и внутреннее трение не позволяют части материала самотеком выйти из бункера) и зависание над выпускным отверстием (сводообразование в нижней части бункера и заклинивание частиц сыпучего материала непосредственно в выпускном отверстии) [16]. Наиболее тяжелыми по последствиям являются полные остановки выгрузки сыпучего материала на срок от нескольких часов до нескольких суток [17]. В свою очередь, остановка бункерной установки как важного перегрузочно-го звена в любой логистической цепи доставки сыпучих грузов

приведет неизбежно к сбою по всей протяженности логистической цепи.

Теория сводообразования достаточно описана в работах отечественных и зарубежных исследователей [18-22]. Для возобновления процесса выгрузки необходимо привлечение дополнительных материальных, трудовых и энергетических ресурсов для разрушения свода материала. При отсутствии иных средств эта работа выполняется вручную, что сопровождается случаями нарушения техники безопасности, приводит к травмам, увечьям, а иногда и к смертельным случаям.

Поэтому возникает необходимость использования специальных побудителей истечения, снижающих ресурс оборудования. Подробная классификация сводообрушающих устройств, а также анализ их достоинств и недостатков представлены в [23].

Одним из наиболее часто используемых типов сводообрушающих устройств являются пневматические. Рабочим телом является воздух под давлением до 0,4-0,7 МПа. В состав пневматической сводообрушающей системы входят: источник сжатого воздуха, несколько пневматических сопел-форсунок, размещенных в стенках бункера на разной высоте и снабженных электромагнитными клапанами, запорно-регулирующая аппаратура, трубные обвязки, шланги и т.д. (рис. 1).

К достоинствам пневматических систем относятся отсутствие механического контакта с сыпучим материалом, возможность практически мгновенно подать в застойные зоны большое количество сжатого воздуха, циклический режим работы, экономичность и т.д. Однако анализ теоретических источников и опыта эксплуатации пневматических сводоразрушающих устройств, позволяет сделать вывод о не достаточно полной информации о принципах размещения сопел, а также о влиянии характеристик сыпучего материала и геометрических параметров бункера на выбор параметров работы пневматической системы сводообрушения.

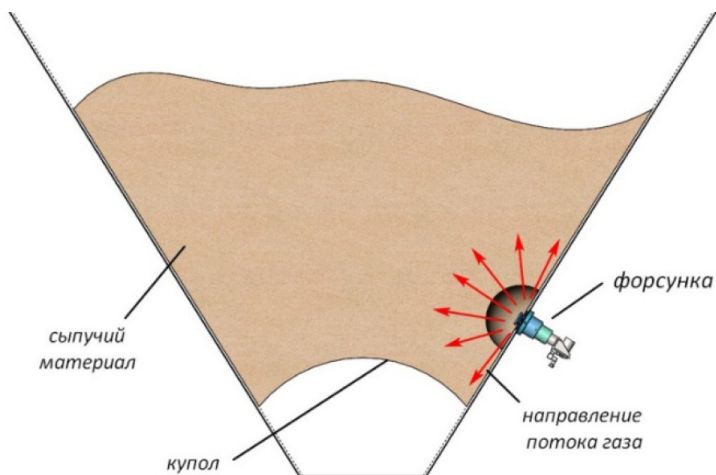


Рис. 1. Схема разреза бункера с зависшим сыпучим материалом и результат единичного импульса пневматической системы сводообрушения

Особенностью рассматриваемой пневматической системы сводообрушения является ее работа при динамически изменяемых характеристиках сыпучего материала (тип материала, фракция, когезивные и адгезивные свойства) и характеристиках внешней среды (влажность). Работа пневматической системы сводообрушения без учета изменения этих факторов не является эффективной. С другой стороны, отнести функции контроля изменения этих факторов на оператора, управляющего технологическим процессом транспортирования сыпучих грузов, не представляется возможным.

Поэтому предлагается использовать систему автоматизированного управления (САУ) режимами и параметрами пневматической сводообрушающей системы. В качестве показателя эффективности работы САУ пневматической системы сводообрушения может являться удельная энергия потока сжатого газа, которая требуется для разрушения свода $E_{уд}$, т.е. отношение количества затраченной на единичный импульс энергии E_i к величине полезного выхода m_i – массе выгруженного из бункера за этот импульс

материала. Минимальное суммарное значение этого отношения за количество импульсов N будет являться целевой функцией системы: $E_{уд} = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{E_i}{m_i} \rightarrow \min$.

Цель работы и требования к разрабатываемой САУ

Целью настоящей работы является разработка алгоритма системы управления пневматической сводообрушающей системы на основании анализа и распознавания результатов единичного импульса с помощью специально созданной нейронной сети. Задача анализа и распознавания результатов близка к задаче классификации [24]. В данном случае классификации подлежат технологические параметры, которые поступают на вход нейронной сети. На выходе сети при этом должен появиться признак решения, которое она приняла с учетом минимума целевой функции.

Требования к САУ можно разделить на несколько групп: требования эффективности и качества управления, устойчивости при непрерывном изменении параметров управляемой системы, экономичности и т.п.

Обоснование состава элементов и набора параметров САУ

Для обоснования состава элементов и алгоритма работы проектируемой САУ требуется рассмотреть возможные технологические ситуации, описываемые наборами параметров.

Исходной ситуацией для работы САУ является зависание материала. Оно обычно устанавливается по сигналу от датчика количества материала на выходном транспортере. Датчик выдает информационный сигнал о зависании и управляющий сигнал на прекращение подачи материала в бункер.

Желаемой конечной ситуацией для САУ является полная выгрузка зависшего материала за минимальное количество импульсов при минимальном расходе пневматической энергии.

Технологические ситуации, которые возникают при работе системы пневмообрушения с двумя уровнями расположения сопел-фор-

сунок приведены на рис. 2. Стоит отметить наличие двух видов деформаций материала при воздействии потока сжатого газа, в конечном итоге приводящих к разрушению свода. Первый вид деформации – упругое сжатие частиц сыпучего материала, второй – изменение структуры материала, ведущее к изменению его пористости. Пористость может изменяться как вследствие сдвигов частиц, так и в результате частичного разрушения частиц. Пористость сыпучего материала может как уменьшаться, так и увеличиваться [25].

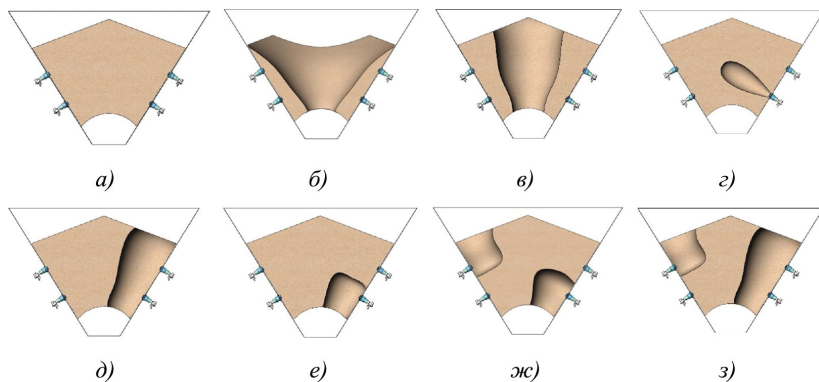


Рис. 2. Схемы вариантов технологических ситуаций, возникающих при работе пневматической сводообрушающей системы.

На рис. 2 приведена исходная технологическая ситуация – свод зависшего сыпучего материала до начала действия пневматической сводообрушающей системы (рис. 2, а). В результате действия пневматической сводообрушающей системы материал может прийти в движение в режиме гидравлического истечения (англ. *funnel flow*). На (рис. 2, б) показана т.н. «воронка» сыпучего материала. При остановке гидравлического истечения материала появляется т.н. вертикальная «труба» (англ. *rathole*) (рис. 2, в). На (рис. 2, г) показан вариант горизонтальной «трубы», которая является локальным разуплотнением материала в зоне импульсного действия потока сжатого воздуха и сопровождается существенным уплотнением материала на противоположной от сопла стороне бункера. Эта техно-

логическая ситуация характерна для применения высокоэнергетических ударных импульсных устройств (например, пневмопушек) конструкцией которых не предусмотрена возможность регулировки силы удара газовой струи. Остальные схемы вариантов (рис. 2, г-з) иллюстрируют разные сочетания горизонтальных и вертикальных «труб» в материале.

Предлагается несколько вариантов исполнения пневматической системы сводообрушения. В состав более простой и дешёвой системы входят (рис. 3): компрессор с системой подготовки воздуха, обратный клапан, ресивер с шаровым краном, пропорциональный электромагнитный клапан с возможностью регулировки подачи воздуха, несколько трубных обвязок с пневматическими форсунками, установленными на разных уровнях в стенках бункера. Для более эффективного управления система должна иметь индивидуальные электромагнитные клапаны, установленные на каждой пневмофорсунке.

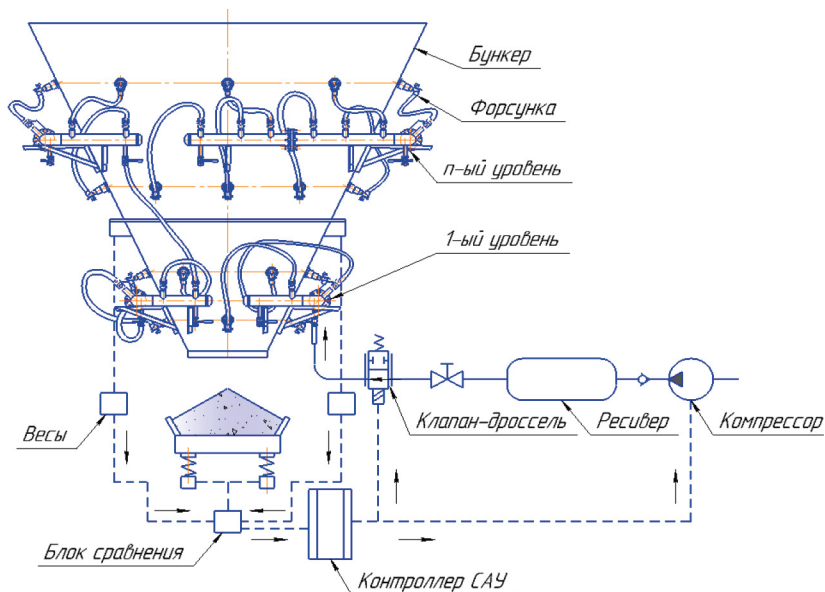


Рис. 3. Схема пневматической системы сводообрушения с интеллектуальной обратной связью на основе искусственной нейронной сети

В состав САУ входят датчики веса материала на выходном конвейере, 4 датчика веса с сыпучего материала внутри бункера, блок сравнения, многоканальный контроллер.

К входным параметрам, описывающим технологическую ситуацию, относятся: p_1 – кодифицированное обозначение типа материала, p_2 – фракционный состав, p_3 – влажность сыпучего материала; p_4 – номер пневмофорсунки, на которую был подан последний импульс; p_5 – вес материала в бункере; p_6 и p_7 – координаты центра масс материала в бункере; p_8 – вес материала на выходном конвейере.

К выходным параметрам САУ относятся: o_1 – значение давления, o_2 – значение подачи, o_3 – номер пневмофорсунки для следующего импульса.

Внутренние параметры САУ: накопленные значения веса материала, накопленное значение количества затраченной на единственный импульс энергии E_i и накопленное значение количества удельной энергии $E_{уд}$ затраченной на весь процесс разрушения свода.

Алгоритм работы проектируемой САУ

Предлагается следующий алгоритм работы САУ пневмосистемы:

1. При появлении сигнала о прекращении подачи материала в бункер из ячеек оперативной памяти контроллера вызываются параметры, характеризующие кодифицированное обозначение типа материала (параметр p_1), его фракционного состава (параметр p_2) и влажности (параметр p_3).

2. Считывается информация, содержащаяся в ячейке с номером пневмофорсунки, на которую был подан последний импульс (параметр p_4). При начале работы САУ в этой ячейке будет записан ноль.

3. С датчиков веса считывается значение веса материала в бункере (параметр p_5) и координаты его центра масс (параметры p_6 и p_7) и записывается в оперативную память. Это необходимо для выявления ситуации, когда материал застревает не равномерно

(см. рис.2, г – з). Координата центра масс рассчитывается по известным формулам: $x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$ и $y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}$, где x_i, y_i и m_i – координаты каждого из датчиков, установленных под опорами бункера и вес материала, который показывает датчик, $i=1 \div 4$.

4. С датчика считывается значение веса материала на выходном конвейере (параметр p_8).

5. Значение веса материала на выходном конвейере с инкрементом записывается в советующую ячейку оперативной памяти контроллера.

6. Накопленное значение веса материала на выходном конвейере сравнивается со значением веса материала при начале работы САУ. Если значения первоначального веса материала и накопленного значения совпадают, то работа САУ прекращается.

7. В противном случае вектор входных параметров $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$ передается на вход предварительно обученной искусственной нейронной сети. Результатом работы нейронной сети является вектор выходных параметров $O = \{o_1, o_2, o_3\}$, включающего параметры: o_1 – значение давления, o_2 – значение подачи, o_3 – номер пневмофорсунки для следующего импульса.

8. Эти параметры являются управляющими сигналами для электромагнитного клапана соответствующей пневмофорсунки и компрессора системы.

9. Процесс повторяется с блока 2.

Выбор метода решения задачи классификации

Задача выбора выходных параметров по вектору входных относится к задачам классификации. Математическая постановка задачи выглядит следующим образом. Пусть задано некоторое конечное множество ситуаций:

$$C = \{c_1, \dots, c_{|c|}\}, \quad (1)$$

конечное множество наборов технологических параметров (признаков технологической ситуации):

$$F = \{f_p, \dots, f_{|I|}\}, \quad (2)$$

и неизвестная целевая функция Φ , которая для каждой пары <набор, ситуация> определяет, степень их соответствия:

$$\Phi: F \times C \rightarrow \{0, 1\} \quad (3)$$

Задача классификации заключается в нахождении максимально близкого классификатора Φ' к Φ .

Машинное обучение основывается на коллекции наборов:

$$Q = \{f_p, \dots, f_{|Q|}\} \subseteq F \quad (4)$$

При этом, значение целевой функции Φ известно для каждой пары $\langle f_p, C_j \rangle \in C$. Наборы параметров из Q разделяют на две непересекающиеся коллекции:

1. Учебная. Представляет собой набор параметров, для которых находится классификатор.

2. Тестовая. Подготовленный набор параметров, для которых определено значение целевой функции. Приближение результата вывода классификатора к тестовой коллекции определяет работоспособность и эффективность классификатора. Набор $f \in C$ называется положительным или отрицательным примером для ситуации s , если значение функции равно 1 или 0, соответственно [26].

К наиболее распространенным методам (алгоритмам) решения задач классификации относятся [27]: линейная регрессия, логистическая регрессия, алгоритм k -ближайших соседей (*K-Nearest Neighbors*), деревья решений и случайный лес (*Decision Trees and Random Forests*), метод опорных векторов (*Support Vector Machines*), метод k -средних (*K-Means Clustering*), метод главных компонент (*Principal Component Analysis*). Описание, основные достоинства и недостатки каждого метода достаточно подробно описаны в [28].

Для поставленной задачи классификации хорошо подходит многослойная нейронная сеть. Исходя из особенностей работы системы, была выбрана архитектура и математическая модель рекуррентной нейронной сети с обратной связью [29-30]. Такие сети, которые состоят из входного слоя, скрытых вычислительных слоев внутри системы и выходного слоя нейронов называют многослой-

ным персептроном MLP (*MultiLayer Perceptron*). На рис.4 представлена структурная схема двухслойного персептрона.

Показанная на рис. 4 сеть – трехслойная: входные сигналы сети x_1, x_2, \dots, x_N составляют входной слой, выходные сигналы первого нейронного слоя g_1, g_2, \dots, g_L образуют первый скрытый слой, а выходные сигналы y_1, y_2, \dots, y_M – выходной слой.

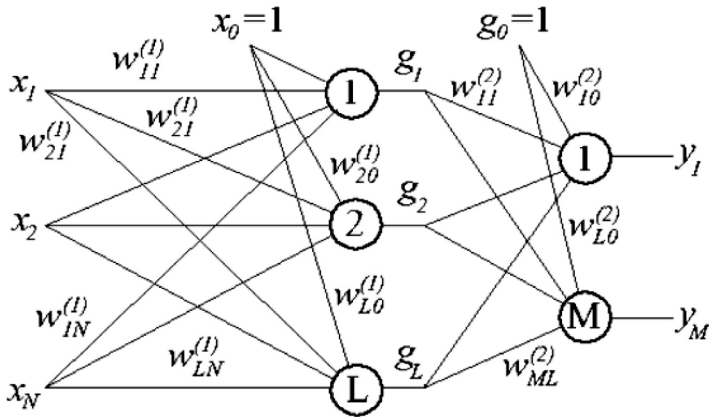


Рис. 4. Структурная схема многослойного персептрона [31]

Формулы для расчета выходных сигналов слоев нейронов:

$$g_l = f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right), l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

$$y_i = f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot g_l \right) = f \left(\sum_{l=0}^L w_{il}^{(2)} \cdot f \left(\sum_{j=0}^N w_{lj}^{(1)} \cdot x_j \right) \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

Целевая функция для единичной обучающей выборки $\langle X, D \rangle$ выглядит следующим образом:

$$E(W) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (y_i - d_i)^2 \quad (7)$$

Целевая функция для множества обучающих пар $\langle X_k, D_k \rangle, k=1, 2$, имеет вид суммы по всем парам:

$$E(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M (y_i - d_i)^2 \quad (8)$$

где $D = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ – вектор ожидаемых значений.

Цель обучения многослойного персептрона: при входном векторе X^k необходимо подобрать такие значения весов сети $w_{ij}^{(l)}$ и $w_{il}^{(2)}$, чтобы выходной вектор Y^k и вектор ожидаемых значений D^k максимально совпадали [32].

Преимущество нейронной сети заключается в том, что она может работать в нелинейных условиях. Тем не менее, алгоритм должен хранить и использовать большие объемы данных, что требует не только большой вычислительной мощности, но и большого объема памяти в системе управления, что существенным является недостатком предлагаемого решения.

Заключение

1. В работе проведен анализ требований к системе автоматизированного управления параметрами работы пневматической сводообрушающей системы.
2. На основании анализа возможных состояний системы, обоснован состав элементов системы и наборы входных, промежуточных и выходных параметров системы, а также целевая функция работы системы. Показано, что система может быть построена на основе искусственной нейронной сети.
3. Разработан алгоритм системы автоматизированного управления параметрами работы пневматической сводообрушающей системы.
4. Выбран тип рекуррентной искусственной нейронной сети с обратной связью.
5. Требуется дальнейшие исследования по обучению и экспериментальной проверки качества работы искусственной нейронной сети.

Список литературы

1. Куренков П.В., Вакуленко С.П. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок//Экономика железных дорог. – 2012. – № 12. – С. 96.

2. Баритко А.Л., Куренков П.В. Организация и технология внешне-торговых перевозок// Железнодорожный транспорт. – 1998. – № 8.
3. Мохонько В.П., Исаков В.С., Куренков П.В. Ситуационное управление перевозочным процессом // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2004. – № 11. – С. 14.
4. Мохонько В.П., Исаков В.С., Куренков П.В. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте// Бюллетень транспортной информации. – 2004. – № 9. – С. 22.
5. Формирование системы финансового менеджмента: теория, опыт, проблемы, перспективы/ Коллективная монография: Сафронова А.А., Рудакова Е.Н., Куренков П.В. и др. / Москва, 2018. – 228 с. ISBN: 978-5-907084-31-5
6. Покровская О.Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона. –Монография / Новосибирск, 2012. – 184 с. ISBN: 978-5-94301-276-1
7. Покровская О.Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 13-23.
8. Покровская О.Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 1 (74). – С. 152-163.
9. Покровская О.Д. Логистическая классность железнодорожных станций // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (38). – С. 68-76.
10. Покровская О.Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций// Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 80-94.
11. Pokrovskaya O.D. Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions// Sustainable economic development of regions. Ed. By L. Shlossman. Vienna, 2014. С. 154-175.

12. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Т. 1115. С. 570-577. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_55
13. Дроздова М.А. Международные санкции как средства регулирования мировой экономики // В сборнике: *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке. Сборник трудов III Национальной научно-практической конференции. Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ФГБОУ ВО ПГУПС*, 2020. С. 113-116.
14. Дроздова М.А., Кравченко Л.А. Антиглобализм в контексте современного международного экономико-правового дискурса // *Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева*. 2020. Т. 1. № 3 (96). С. 247-253.
15. Дроздова М.А., Кравченко Л.А., Панков Д.А. Цифровая экономика и инфляция в период пандемии // В сборнике: *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке. Сборник трудов III Национальной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО ПГУПС*, 2020. С. 11-14.
16. Варламов А.В. Конструкция и динамика механизмов предотвращения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов: монография. - Самара: СНЦ РАН, 2010.
17. Воробьев А.А., Попов Д.Е., Мигров А.А. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния стенок бункера с сыпучим материалом при моделировании материала методом дискретных элементов. - III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 томах. Том 1, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года /. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. –с.92-95 - ISBN 978-5- 7641-1708-9.
18. Гячев Л.В. Основы теории бункеров и силосов : Учеб. пособие /Л. В. Гячев; Алт. политехн. ин-т им. И. И. Ползунова. - Барнаул : АПИ, 1986. - 84 с. : ил.; 20 см.
19. Богомягких В. А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов / В. А. Богомягких. – Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1974. – 149 с.

20. Schulze Dietmar. Powders and Bulk Solids. Behavior, Characterization, Storage and Flow. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, New York. 2008. -512 p. ISBN 978-3-540-73768-1.
21. Shamlou P. A. Handling of bulk solids, theory and practice. London: Butterworths, 1988, 193 p.
22. Khashayar Saleh, Shahab Golshan, Reza Zarghami. A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos - Basics and practical aspects. Chemical Engineering Science, №192 (2018). p. 1011–1035.
23. Варламов, А.В. Классификация и анализ устройств для разрушения сводов сыпучих материалов в бункерных устройствах [Текст] / А.В. Варламов. Межвузовский сборник научных трудов, «Механизация и автоматизация техно-логических процессов на транспорте и в агропромышленном комплексе». - Самара, СамИИТ, вып. 16, 1998. – С. 97 – 104.
24. Andrew R. Webb. Statistical Pattern Recognition. — Wiley & Sons Ltd., 2002. ISBN 0-470-84513-9.
25. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. 2-е изд., испр. и перераб. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. – 280 с., ил. ISBN 5-274-00152-1
26. Гилязетдинов, А. О. Методы классификации в решении задач нечеткого сравнения текстовых данных / А. О. Гилязетдинов, Н. А. Петров. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2021. – № 14 (356). – С. 19-23. — URL: <https://moluch.ru/archive/356/79781/> (дата обращения: 17.11.2022).
27. Shai Shalev-Shwartz, Shai Ben-David. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms – Cambridge University Press. 2014. ISBN 978-1-107-05713-5.
28. Nick McCullum. 9 Key Machine Learning Algorithms Explained in Plain English. [Электронный ресурс]/ URL <https://www.freecodecamp.org/news/a-no-code-intro-to-the-9-most-important-machine-learning-algorithms-today/> (дата обращения: 17.11.2022).
29. Стоянов А.К. Нейронная сеть, основанная на точечных отображениях // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 5. – С. 96–101.

30. Стоянов А.К. Применение рекуррентной нейронной сети для решения задачи кластеризации // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С.144-149.
31. Однонаправленные многослойные сети сигмоидального типа. [Электронный ресурс]/ URL: http://www.igce.comcor.ru/AI_mag/NN/OneWayNets/OneWayNets.html (дата обращения 17.11.2022).
32. Горбунова Е. С. Реализация интеллектуальной системы распознавания эмоций с применением нейронных сетей: магистерская диссертация / Е. С. Горбунова; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт «Высшая школа экономики и менеджмента», Кафедра анализа систем и принятия решений. – Екатеринбург, 2017. – 80 с. – Библиогр.: с. 76-80 (62 назв.). [Электронный ресурс]/ URL:<https://elar.urfu.ru/handle/10995/54386>

References

1. Kurenkov P.V., Vakulenko S.P. Financial and economic solution of the problem of domestic transportation//Economics of railways. – 2012. – No. 12. – p. 96.
2. Baritko A.L., Kurenkov P.V. Organization and technology of foreign trade transportation// Rail transport. – 1998. – № 8.
3. Mokhonko V.P., Isakov V.S., Kurenkov P.V. Situational management of the transportation process // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. – 2004. – No. 11. – p. 14.
4. Mokhonko V.P., Isakov V.S., Kurenkov P.V. Problems of creating a situational and analytical control system for the transportation process on a railway transport// Bulletin of transport information. - 2004. – No. 9. – p. 22.
5. Formation of the financial management system: theory, experience, problems, prospects/ Collective monograph: Safronova A.A., Rudakova E.N., Kurenkov P.V., etc. / Moscow, 2018. – 228 p. ISBN: 978-5-907084-31-5
6. Pokrovskaya O.D. Logistic storage and distribution centers as the basis of the terminal network of the region. –Monograph / Novosibirsk, 2012. – 184 p. ISBN: 978-5-94301-276-1

7. Pokrovskaya O.D. The state of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia // Innovative transport. – 2015. – № 1 (15). – Pp. 13-23.
8. Pokrovskaya O.D. On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure // Mir transport. – 2018. – T. 16. – № 1 (74). Pp. 152-163.
9. Pokrovskaya O.D. Logistic class of railway stations // Bulletin of the Ural State University of Railways. – 2018. – № 2 (38). – Pp. 68-76.
10. Pokrovskaya O.D. Logistics transport systems of Russia in the conditions of new sanctions// Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – No. 1. – pp. 80-94.
11. Pokrovskaya O.D. Deterministica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions// Sustainable economic development of regions. Ed. By L. Shloss-man. Vienna, 2014. pp. 154-175.
12. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. pp. 570-577. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_55
13. Drozdova M.A. International sanctions as a means of regulating the global economy // In the collection: Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century. Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference. Federal Agency of Railway Transport, FSUE IN PGUPS, 2020. pp. 113-116.
14. Drozdova M.A., Kravchenko L.A. Anti-globalism in the context of modern international economic and legal discourse // Bulletin of the V.N. Tati-shchev Volga State University. 2020. Vol. 1. No. 3 (96). pp. 247-253.
15. Drozdova M.A., Kravchenko L.A., Pankov D.A. Digital economy and inflation during the pandemic // In the collection: Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century. Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference. FGBOU VO PGUPS, 2020. pp. 11-14.

16. Varlamov A.V. Design and dynamics of mechanisms for preventing and eliminating vaulting in storage bunkers and the release of bulk materials: monograph. - Sa-mara: SNC RAS, 2010.
17. Vorobyev A.A., Popov D.E., Migrov A.A. Features of the formation of the stress-strain state of the walls of a hopper with bulk material when modeling the material by the method of discrete elements. - III Betancourt International Engineering Forum: proceedings. In 2 volumes. Volume 1, St. Petersburg, December 2-3, 2021 /. – St. Petersburg: FSUE VO PGUPS, 2021. –pp.92-95 - ISBN 978-5- 7641-1708-9.
18. Gachev L.V. Fundamentals of the theory of bunkers and silos: Text-book / L. V. Gachev; Alt. po-litehn. I. I. Polzunov Institute. - Barnaul: API, 1986. - 84 p. : ill.; 20 cm.
19. Bogomyagkikh V. A. Theory and calculation of bunkers for bulk materials / V. A. Bogomyagkikh. – Rostov-on-Don: Publishing house of the Russian State University, 1974. – 149 p.
20. Schulze Dietmar. Powders and Bulk Solids.Behavior, Characterization, Storage and Flow. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, New York. 2008. -512 p. ISBN 978-3-540-73768-1.
21. Shamlou P. A. Handling of bulk solids, theory and practice. London: Butterworths, 1988, 193 p.
22. Khashayar Saleh, Shahab Golshan, Reza Zarghami. A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos - Basics and practical aspects. Chemical Engineering Science, No.192 (2018). p. 1011-1035.
23. Varlamov, A.V. Classification and analysis of devices for destruction of arches of bulk materials in bunker devices [Text] / A.V. Varlamov. Interuniversity collection of scientific works, “Mechanization and automation of technological processes in transport and in the agro-industrial complex”. - Samara, SamIIT, issue 16, 1998. – pp. 97 – 104.
24. Andrew R. Webb. Statistical Pattern Recognition. — Wiley & Sons Ltd., 2002. ISBN 0-470-84513-9.
25. Kandaurov I. I. Mechanics of granular media and its application in construction. 2nd ed., ispr. and reprint L.: Stroyizdat, Leningr. edition, 1988. — 280 p., ill. ISBN 5-274-00152-1

26. Gilyazetdinov, A. O. Classification methods in solving problems of fuzzy comparison of text data / A. O. Gilyazetdinov, N. A. Petrov. – Text: direct // Young scientist. – 2021. – № 14 (356). – Pp. 19-23. – URL: <https://moluch.ru/archive/356/79781/> / (date of request: 17.11.2022).
27. Shai Shalev-Shwartz, Shai Ben-David. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms – Cambridge University Press. 2014. ISBN 978-1-107-05713-5.
28. Nick McCullum. 9 Key Machine Learning Algorithms Explained in Plain English. [Electronic resource] / URL <https://www.freecodecamp.org/news/a-no-code-intro-to-the-9-most-important-machine-learning-algorithms-today/> / (date of request: 17.11.2022).
29. Stoyanov A.K. Neural network based on point maps // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. - 2008. – Vol. 313. – No. 5. – pp. 96-101.
30. Stoyanov A.K. Application of recurrent neural network for solving the clustering problem // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. – 2009. – Vol. 315. – No. 5. – pp.144-149.
31. Unidirectional multilayer networks of sigmoidal type. [Electronic resource] / URL: http://www.igce.comcor.ru/AI_mag/NN/OneWayNets/OneWayNets.html (date of issue 17.11.2022).
32. Gorbunova E. S. Implementation of an intelligent emotion recognition system using neural networks: Master's thesis / E. S. Gorbunova; Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Institute “Higher School of Economics and Management”, Department of Systems Analysis and Decision-making. – Yekaterinburg, 2017. – 80 p. – Bibliogr.: pp. 76-80 (62 titles). [Electronic resource] / URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/54386>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Александр Алфеевич, д.т.н., доц. заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы» *Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I*

пр-т Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация
nttk@pgups.ru

Мигров Александр Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
пр-т Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация

Романова Ирина Юрьевна, к.т.н., доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
пр-т Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация
romira-spb@mail.ru

Евтюков Станислав Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой транспортных систем
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
пр-т Московский, 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация
ese-89@mail.ru

Москвичев Олег Валерьевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой»
Самарский государственный университет путей сообщения
ул. Свободы, 2В, г. Самара, Российская Федерация
moskvichev063@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Vorobyov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department “Ground Transport and Technological Complexes”

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation
nttk@pgups.ru*

Alexander A. Migrov, Senior Lecturer of the Department “Ground Transport and Technological Complexes”

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation*

Irina Yu. Romanova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Operational Work Management”

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation
romira-spb@mail.ru*

Stanislav S. Evtyukov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Transport Systems

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation
ese-89@mail.ru*

Oleg V. Moskvichev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department “Operational Work Management”

*Samara State University of Railways
2B, Svobody Str., Samara, Russian Federation
moskvichev063@yandex.ru*

Поступила 10.01.2023

После рецензирования 25.01.2023

Принята 30.01.2023

Received 10.01.2023

Revised 25.01.2023

Accepted 30.01.2023