

УДК 625.7

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.52.1.009](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.52.1.009)

Математическое обеспечение и алгоритм нечеткого управления для технологического процесса разогрева битума

И.Н. Волков✉, В.Л. Бурковский, К.Ю. Гусев

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

Резюме. Разработка эффективных систем управления для сложных технологических процессов, функционирующих в условиях неопределенности, является актуальной задачей в области математического и программного обеспечения вычислительных систем. В качестве объекта исследования рассматривается процесс разогрева битума при производстве асфальтобетонных смесей, характеризующийся большим количеством взаимодействующих переменных, нелинейностью. Основная задача исследования заключается в разработке адаптивного управляющего алгоритма, использующего аппарат нечеткой логики для формализации эвристических правил, применяемых при принятии решений. В рамках работы представлена архитектура математического обеспечения данной системы, которая состоит из трех основных модулей: модуля анализа поступающих данных, модуля прогнозирования и модуля формирования управляющих воздействий. Описана процедура ситуационной идентификации состояния системы на основе вероятностного подхода с использованием нечетких множеств для работы с граничными состояниями и погрешностями измерений. Основным результатом является разработка набора матриц нечетких переходов, которые определяют динамику изменения состояния системы при различных управляющих воздействиях. Представленный алгоритм демонстрирует способность стабилизировать температуру битума в целевом диапазоне 150–170 °С при наличии внешних и внутренних возмущений. Полученные результаты могут быть применены для создания специализированного программного обеспечения систем управления на различных производственных объектах.

Ключевые слова: математическое обеспечение, алгоритм управления, нечеткая логика, система принятия решений, технологический процесс, разогрев битума, нечеткие множества, матрицы переходов.

Для цитирования: Волков И.Н., Бурковский В.Л., Гусев К.Ю. Математическое обеспечение и алгоритм нечеткого управления для технологического процесса разогрева битума. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2127> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.009

Mathematical software and a fuzzy control algorithm for a bitumen heating process

I.N. Volkov✉, V.L. Burkovsky, K.Yu. Gusev

Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. Developing effective control systems for complex technological processes operating under uncertainty is a pressing issue in the field of mathematical and software engineering for computing systems. This study focuses on the process of heating bitumen during the production of asphalt concrete mixtures, characterized by a large number of interacting variables and nonlinearity. The primary objective of the study is to develop an adaptive control algorithm using fuzzy logic to formalize heuristic rules applied in decision-making. This paper presents the architecture of the mathematical support for this system, which consists of three main modules: an incoming data analysis module, a forecasting

module, and a control action generation module. A procedure for situational identification of the system state is described, based on a probabilistic approach using fuzzy sets to handle boundary states and measurement errors. The main result is the development of a set of fuzzy transition matrices that determine the dynamics of changes in the system state under various control actions. The presented algorithm demonstrates the ability to stabilize the bitumen temperature in the target range of 150–170 °C in the presence of external and internal disturbances. The obtained results can be applied to the creation of specialized software for control systems in various industrial facilities.

Keywords: mathematical software, control algorithm, fuzzy logic, decision-making system, technological process, bitumen heating, fuzzy sets, transition matrices.

For citation: Volkov I.N., Burkovsky V.L., Gusev K.Yu. Mathematical software and a fuzzy control algorithm for a bitumen heating process. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2127> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.009

Введение

Повышение эффективности управления технологическими процессами связано с развитием математического обеспечения. Особую сложность представляют собой объекты управления, для которых характерны нелинейность, взаимовлияние множества переменных. Классические методы теории автоматического управления зачастую оказываются недостаточно эффективными для таких объектов, поэтому необходима разработка других подходов, основанных на нечеткой логике [1].

В качестве примера сложного объекта управления рассматривается процесс разогрева битума, от корректности которого зависят ключевые качества асфальтобетонного покрытия.

Целью работы является разработка математического обеспечения и алгоритма управления на основе аппарата нечеткой логики. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- формализовать общую структуру адаптивного алгоритма управления;
- идентифицировать и классифицировать входные и выходные параметры системы на примере процесса разогрева битума;
- разработать модель принятия решений с использованием матриц нечетких переходов [2].

Материалы и методы

В настоящее время для управления нелинейными технологическими процессами, такими как разогрев битума, применяются различные методы. Классические ПИД-регуляторы обладают простотой реализации, но часто оказываются неэффективными при наличии нелинейностей, запаздываний и взаимовлияющих переменных. Современные подходы включают нейросетевые модели, гибридные системы, а также методы нечеткой логики. В частности, для задач температурного контроля при производстве асфальтобетонной смеси применяются нечеткие регуляторы, однако большинство существующих решений либо требуют значительных объемов данных для обучения, либо не предоставляют прозрачного механизма принятия решений. В данной работе предлагается подход, сочетающий определение текущего состояния системы и управление через матрицы нечетких переходов, что позволяет формализовать экспертные знания при ограниченной статистике данных.

Объектом управления является процесс разогрева битума, а целью – поддержание температуры выходного битума в заданном диапазоне 150–170 °C [3]. От процесса разогрева зависят такие важные качества готового продукта, как прочность,

водостойкость, морозостойкость. Нарушение процесса разогрева приводит к дефектам: расслоению, трещинам и сокращению срока службы дороги.

Процедура управления нагревом битума подлежит алгоритмической формализации применительно к каждому регулируемому параметру. Регулирование температурного режима осуществляется на основе данных, получаемых с контрольно-измерительного оборудования, с использованием традиционных законов регулирования [4].

Опишем общую структуру алгоритма, регулирующего нагрев битума. В предлагаемой архитектуре предусмотрены функциональные блоки анализа данных и прогнозирования, результатом работы которых является формирование начального управляющего воздействия $U_{нач}$ (Рисунок 1).

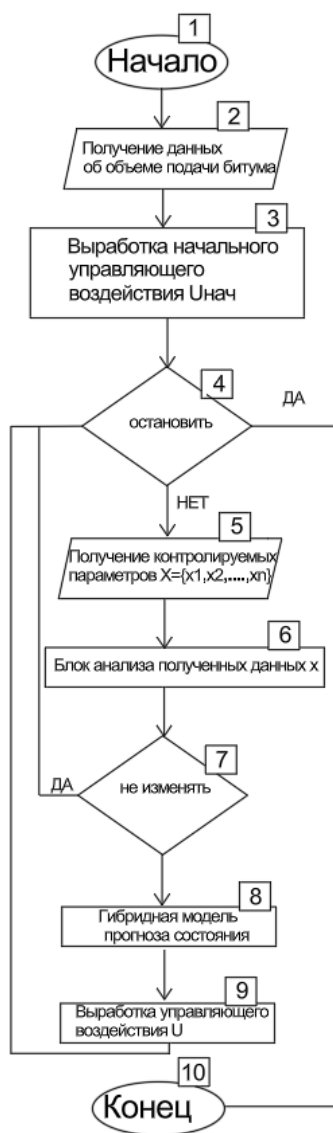


Рисунок 1 – Обобщенная блок-схема алгоритма управления

Figure 1 – Generalized block diagram of the control algorithm

В данной блок-схеме, на стартовом этапе (блок 2) выполняется оценка количества подаваемого битума и мониторинг нормативных параметров всего процесса нагрева:

- 1) Температурные и физико-химические свойства битума:
 - температура;

- влажность (присутствие воды может приводить к парообразованию и вспениванию);
 - вязкость (повышенная вязкость затрудняет прогрев);
 - плотность;
 - объем / масса;
- 2) Параметры оборудования и внешние условия:
- температура окружающей среды;
 - мощность нагревательного элемента;
 - конструктивные особенности нагревателя;
 - длительность взаимодействия с источником тепла;
 - наличие посторонних примесей, способных изменить характеристики материала;
 - начальная температура битума перед нагревом.

Представленная информация, полученная в блоке 2, служит основой для расчета стартового управляющего сигнала $U_{\text{нач}}$ [5].

Далее алгоритм функционирует в циклическом режиме, в рамках которого выполняется непрерывная коррекция всех регулируемых параметров технологического процесса [6]. Перечень ключевых контролируемых величин приведен в Таблице 1.

Таблица 1 – Основные контролируемые параметры при разогреве битума
Table 1 – Main controlled parameters during bitumen heating

№	Контролируемый параметр	Обозначение
1	Температура исходного битума	$T_{\text{битума исх}}$
2	Влажность	$F_{\text{битума}}$
3	Вязкость битума	$W_{\text{битума}}$
4	Плотность битума	$\rho_{\text{битума}}$
5	Скорость потока битума	$V_{\text{битума}}$
6	Объем битума	$V_{\text{битума}}$
7	Мощность нагревателя	$P_{\text{нагрев}}$
8	Время разогрева	$t_{\text{разогрева}}$
9	Конструкция и материалы нагревателя	$A_{\text{нагрев}}$
10	Температура окружающей среды	$T_{\text{окр среды}}$
11	Температура битума на выходе	$T_{\text{битума вых}}$

Функцией блока 7 является обработка косвенных характеристик, отражающих ход нагрева битума. В рамках этой процедуры выполняется диагностика состояния технологического объекта на основе производных параметров. Полученные диагностические данные служат основанием для блока 8, где при необходимости производится корректировка режимов работы [7].

Итоговым этапом является формирование в блоке 9 вектора управления U . Данный вектор представляет собой комплекс воздействий $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, где каждый компонент U_i соответствует управляющему сигналу для отдельного регулируемого параметра [8].

С точки зрения системы управления, регулируемые параметрами выступают все переменные технологического процесса нагрева битума, изменение которых позволяет поддерживать функционирование объекта в требуемых эксплуатационных пределах [8].

Управляющий вектор равен $U^{(n)} = U^{(n-1)} + \Delta U^{(n)}$, где $U^{(n)}$ – управление на шаге n , $\Delta U^{(n)}$ – изменение управления. $U^{(n)}$ представляет собой зависимость от предыдущего управления и набора векторов контролируемых параметров на предыдущих шагах:

$U(n) = F(U^{(n-1)}, X')$, где X' – массив векторов контролируемых параметров X , то есть $X' = \{X^{(k)}, X^{(k+1)}, \dots, X^{(n)}\}$. Информация может собираться за ограниченное число измерений, поэтому k не обязательно равно 1.

Для лучшего понимания динамики управления исследуем взаимное влияние косвенных параметров прогрева битума и управляющих переменных [9]. Эмпирические наблюдения позволяют сформулировать следующие закономерности изменения выходной температуры:

- рост подачи битума вызывает уменьшение температурного показателя конечного материала;
- рост мощности нагревательного устройства увеличивает температуру битума, тогда как ее снижение дает обратный эффект;
- внешние условия, такие как низкая температура окружающей среды, замедляют прогрев.

Ключевым аспектом алгоритма управления является ситуационная идентификация, основанная на вероятностном подходе [10]. Учитывая погрешности измерительных приборов, временные задержки в получении данных, а также влияние случайных факторов, определение текущего состояния системы носит вероятностный характер. Поскольку некоторые параметры могут находиться на границе интервалов, а их измерение сопряжено с погрешностями, состояние системы можно описать с помощью нечетких переменных, отражающих степень принадлежности к тому или иному сценарию.

Результаты

Ключевым итогом работы выступает создание комплекса из семи матриц нечетких переходных состояний. Каждая матрица поставлена в соответствие определенному лингвистическому управляющему воздействию. Размерность матриц составляет 7×7 , при этом строки отображают текущее состояние системы $T_k(i)$, а столбцы – одно из возможных последующих состояний $T_k(j)$. В качестве примера рассмотрим задачу регулирования температуры готового битума, требующей поддержания в интервале 150–170 °C. Формализуем регулирующие переменные следующим образом:

Для переменной ($I_1, \langle T_1 \rangle, X$), описывающей параметр «Температура выходящего битума», эталонным является состояние «в норме». Из данного состояния система может перейти в два других: «низкая» или «немного низкая». Соответствующее терм-множество управляющих команд имеет вид: $\langle T_1 \rangle = \{\text{«Немного увеличить»}, \text{«Увеличить»}, \text{«Сильно увеличить»}\}$.

Для переменной ($I_2, \langle T_2 \rangle, X$) терм-множество $\langle T_2 \rangle = \{\text{«Немного уменьшить»}, \text{«Уменьшить»}, \text{«Сильно уменьшить»}\}$.

Для переменной ($I_3, \langle T_3 \rangle, X$) терм-множество $\langle T_3 \rangle = \{\text{«Не изменять»}\}$.

На основе варьирования управляющих воздействий были построены матрицы, определяющие переходы между состояниями. Введем лингвистическую переменную состояния системы T_k , задав ее терм-множество как $T_k = \{\text{«намного меньше»}, \text{«меньше»}, \text{«немного меньше»}, \text{«в норме»}, \text{«немного больше»}, \text{«больше»}, \text{«намного больше»}\}$. Каждое состояние соответствует определенному диапазону температур. Проведен опрос экспертов на асфальтобетонном заводе, где они оценили вероятность переходов между состояниями при каждом управляющем воздействии по шкале от 0 до 1. На основе их оценок были сформированы нечеткие уравнения, связывающие текущее состояние, управление и следующее состояние, что позволило получить значения вероятностей

переходов. Матрицы получены в результате структурированного алгоритма, сочетающего экспертные знания и математическую формализацию.

После этого было сформировано 7 матриц переходов:

$$Tk=\{Tk1,Tk2,Tk3,Tk4,Tk5,Tk6,Tk7\}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Немного увеличить»:

$$Mi11K=\begin{matrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ \begin{matrix} Tk1 \\ Tk2 \\ Tk3 \\ Tk4 \\ Tk5 \\ Tk6 \\ Tk7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0,3 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3 & 0,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Увеличить»:

$$Mi12K=\begin{matrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ \begin{matrix} Tk1 \\ Tk2 \\ Tk3 \\ Tk4 \\ Tk5 \\ Tk6 \\ Tk7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 1 & 0,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0,1 & 0,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0,1 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 1 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Сильно увеличить»:

$$Mi13K=\begin{matrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ \begin{matrix} Tk1 \\ Tk2 \\ Tk3 \\ Tk4 \\ Tk5 \\ Tk6 \\ Tk7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 1 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Не изменять»:

$$Mi14K=\begin{matrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ \begin{matrix} Tk1 \\ Tk2 \\ Tk3 \\ Tk4 \\ Tk5 \\ Tk6 \\ Tk7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Немного уменьшить»:

$$Mi15K = \begin{vmatrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ Tk1 & 0,9 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk2 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk3 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk4 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 \\ Tk5 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 \\ Tk6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 \\ Tk7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 \end{vmatrix}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Уменьшить»:

$$Mi16K = \begin{vmatrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ Tk1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk2 & 1 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk3 & 0,2 & 1 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk4 & 0 & 0,2 & 0,1 & 0,3 & 0 & 0 & 0 \\ Tk5 & 0 & 0 & 0,2 & 1 & 0,3 & 0 & 0 \\ Tk6 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 1 & 0,3 & 0 \\ Tk7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 1 & 0,3 \end{vmatrix}.$$

Матрица нечетких переходов для управляющего воздействия «Сильно уменьшить»:

$$Mi17K = \begin{vmatrix} & Tk1 & Tk2 & Tk3 & Tk4 & Tk5 & Tk6 & Tk7 \\ Tk1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk4 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Tk5 & 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ Tk6 & 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 \\ Tk7 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 \end{vmatrix}.$$

Каждая матрица соответствует 7 термам температуры. Значения в ячейках отражают степень уверенности в переходе между состояниями. Управляющие воздействия смещают температуру в сторону нормального значения (150–170 °C).

Итогом функционирования алгоритма становится формирование управляющего вектора U , компонентами которого являются индивидуальные управляющие воздействия для всех регулируемых параметров системы: $U = \{U^1, U^2, \dots, U^n\}$. Это позволяет комплексно воздействовать на систему, учитывая взаимовлияние различных факторов.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения предложенного математического аппарата для управления нелинейным процессом. Использование матриц нечетких переходов позволяет формализовать эмпирические закономерности.

Предложенный подход обладает несколькими ключевыми преимуществами по сравнению с классическими методами:

1) Устойчивость к неопределенности: алгоритм корректно работает с неточными измерениями и данными, что характерно для реальных производственных объектов.

2) Адаптивность: итерационная схема расчета $U_{(n)}$ позволяет алгоритму подстраиваться под изменяющиеся условия процесса (например, колебания температуры окружающей среды или свойств исходного сырья).

3) Интерпретируемость: лингвистические правила и матрицы переходов легко анализировать и корректировать.

Заключение

В ходе исследования было разработано математическое обеспечение и адаптивный алгоритм управления технологическими процессами на основе аппарата нечеткой логики. На примере задачи стабилизации температуры разогрева битума показана эффективность предложенного подхода.

Основным научным результатом является разработка набора матриц нечетких переходов, что позволяет количественно и наглядно описывать реакцию системы на управляющие воздействия. Значимость работы заключается в развитии подхода к алгоритмизации процессов нечеткого управления для нелинейных объектов. Предложенный материал с использованием матриц переходов обладает высокой наглядностью и позволяет строго описывать динамику изменения состояния системы под воздействием лингвистических управляющих команд.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Баранова Л.В. Оценка уровня обеспечения экономической безопасности предприятия электроэнергетики на основе алгоритмов нечеткой логики. *Вестник Российского университета кооперации*. 2025;(1):4–11.
Baranova L.V. Assessment of the economic security ensuring level of an electric power company based on fuzzy logic algorithms. *Vestnik of the Russian University of Cooperation*. 2025;(1):4–11. (In Russ.).
2. Барышникова Е.С., Крылосова Н.Ю. Гибридные нейронные сети при управлении непрерывным производством. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2024;(7):47–51.
Baryshnikova E.S., Krylosova N.Yu. Hybrid neural networks in continuous production control. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024;(7):47–51. (In Russ.).
3. Макаш И.С., Бурковский В.Л. Структура системы управления технологическим процессом сушки основного отхода производства в спиртовой отрасли. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012;8(11):152–154.
Makash I.S., Burkovsky V.L. The structure of the control system of the drying process co-product in distillery industries. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012;8(11):152–154. (In Russ.).
4. Прокопьев А.П. Нейро-нечеткая система непрерывного контроля плотности асфальтобетонных смесей. *Прикладная математика и вопросы управления*. 2023;(3):84–94. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.3.06>
Prokopev A.P. Neuro-fuzzy system of continuous control of density asphalt concrete mixtures. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2023;(3):84–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.3.06>
5. Волков И.Н., Бурковский В.Л. Алгоритмизация управления технологическими процессами производства асфальтобетонных смесей. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2023;19(5):16–22. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.5.002>

- Volkov I.N., Burkovsky V.L. Algorithmization of technological processes management of asphalt concrete mixtures production. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2023;19(5):16–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.5.002>
6. Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т. Следящая система автоматического управления процессом укладки асфальтобетонной смеси на основе нечеткой логики. В сборнике: *Труды IX международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '12, 30 января – 02 февраля 2012 года, Москва, Россия*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2012. С. 612–629.
Prokopiev A.P., Emelianov R.T. A tracing system of the automatic control of the process of laying the asphaltic concrete mix based on the fuzzy logic. In: *Proceedings of the IX International Conference "System Identification and Control Problems" SICPRO '12, 30 January – 02 February 2012, Moscow, Russia*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS; 2012. P. 612–629. (In Russ.).
7. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т., Пальчиков П.А. Реализация концепции автоматизации и интеллектуализации управления дорожно-строительными процессами. *Вестник МГСУ*. 2018;13(1):61–70. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.1.61-70>
Prokop'ev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T., Pal'chikov P.A. Implementation of the concept of automation and intellectualization of management of road construction processes. *Vestnik MGSU*. 2018;13(1):61–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.1.61-70>
8. Скоробогатченко Д.А. Прогнозирование состояния сложных объектов автодорожного комплекса на основе нечетких нейронных сетей. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2016;(45):188–198.
Skorobogatchenko D.A. Forecasting of the state of complex objects in the road sector based on fuzzy neural networks. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2016;(45):188–198. (In Russ.).
9. Прокопьев А.П., Большаков А.А. Методы и средства автоматизированного контроля плотности асфальтобетонной смеси для управления укладчиком в процессе строительства покрытия автомобильной дороги. *Программная инженерия*. 2025;16(2):100–112. <https://doi.org/10.17587/prin.16.100-112>
Prokopev A.P., Bolshakov A.A. Methods and Means of Automated Control of the Asphalt Concrete Mixture Density to Controlling Paver in Process of the Road Surface Construction. *Software Engineering*. 2025;16(2):100–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/prin.16.100-112>
10. Волков А.В., Карьгин И.П., Канаева Л.П., Селяев Д.В., Чагрин Н.А., Марченко А.В. Анализ параметров качества изготовления печатных плат с помощью нечеткой логики. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024;(11):33–36.
Volkov A.V., Kargin I.P., Kanaeva L.P., Selyaev D.V., Chagrin N.A., Marchenko A.V. Analysis of PCB manufacturing quality parameters using fuzzy logic. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2024;(11):33–36. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Волков Иван Николаевич, аспирант, **Ivan N. Volkov**, Postgraduate, Voronezh State
Воронежский государственный технический Technical University, Voronezh, the Russian
университет, Воронеж, Российская Федерация. Federation.
e-mail: ivan1900volkov@mail.ru

Бурковский Виктор Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: bvl@vorstu.ru

Viktor L. Burkovsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Drives, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Гусев Константин Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: gussev_konstantin@mail.ru

Konstantin Yu. Gusev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 15.01.2026; принята к публикации 21.01.2026.

The article was submitted 07.11.2025; approved after reviewing 15.01.2026; accepted for publication 21.01.2026.