

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 681.51:004.81:536.2

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2661>

### Аппаратная реализация нечеткой логики на базе элементов тепловой памяти для отказоустойчивого управления в машиностроении



EDN: PHGHYE

 О.В. Володина<sup>1</sup> , А.А. Скворцов<sup>1</sup>  , М.Р. Рыбакова<sup>1</sup>, М.В. Корячко<sup>1,2</sup> 
<sup>1</sup> Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> Российский технологический университет — МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация✉ [skvortsovaa2009@yandex.ru](mailto:skvortsovaa2009@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Автоматизация высокотемпературных процессов (например, лазерной сварки) требует отказоустойчивых систем управления в реальном времени. Традиционные микропроцессоры имеют критические программные задержки, а перспективные платформы вычислений в памяти (MRAM, RRAM) подвержены термической нестабильности и дрейфу состояний в горячих зонах. Существует научный пробел в знаниях о разработке контроллеров, использующих физику теплопереноса в качестве вычислительной среды, превращая тепловую помеху в логический сигнал. Цель данной работы — компьютерное моделирование тепловых потоков в элементах тепловой памяти (ЭТП) для обоснования аппаратной реализации нечеткого вывода. В исследовании решаются задачи топологического формирования вентилях AND/OR и анализа влияния диэлектрической изоляции на настройку весовых параметров.

**Материалы и методы.** Исследование тепловых процессов в ячейках памяти (алюминиевая плёнка, 2–5 мкм, на кремниевой подложке) были проведены методом конечных элементов в модуле Transient Thermal платформы ANSYS Workbench. Ячейки изготовлены методом вакуумного электронно-лучевого испарения: алюминиевые дорожки шириной 75 мкм и длиной 4 мм формировались на подложке кремния. Воздействие осуществлялось прямоугольными токовыми импульсами с амплитудой тока  $(2–2,5) \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> и длительностью 1–2 мс, локальный нагрев структур доходил до 30 °С. Для реализации логических вентилях AND и OR менялись межэлементные расстояния — 0,1 и 0,5 мм соответственно — топологическим способом. Для направленного управления тепловыми потоками в конструкцию были введены диэлектрические карманы из SiO<sub>2</sub> глубиной 30 мкм.

**Результаты исследования.** На основе разработанных компьютерных моделей в среде ANSYS Workbench проведено комплексное исследование нестационарных тепловых полей в структурах ЭТП. Доказано, что внедрение диэлектрической изоляции из SiO<sub>2</sub> позволяет эффективно управлять направлением и мощностью теплового потока, исключая паразитное рассеивание энергии. В ходе моделирования физически обоснована возможность аппаратного формирования базы правил нечеткого вывода непосредственно в топологии кристалла. Установлено, что варьирование межэлементных расстояний является ключевым фактором настройки логики: дистанция в 0,1 мм между входными и выходными элементами обеспечивает реализацию логической операции OR, а дистанция 0,5 мм — операции AND.

**Обсуждение.** Полученные данные подтверждают, что использование пространственного наложения тепловых полей позволяет реализовать нечеткие операции без программных задержек. Время реакции разработанных моделей логических вентилях (1–2 мс) на порядок превосходит показатели стандартных программируемых логических контроллеров (ПЛК) — 20–50 мс. В отличие от памяти на фазовых переходах предложенный метод демонстрирует устойчивость к внешним температурным помехам за счет алгоритмической коррекции логических порогов. Основным ограничением работы является тепловая инерционность кремниевой подложки, которая обуславливает расхождение между результатами моделирования в ANSYS и натурными экспериментами на уровне 5–7 %.

**Заключение.** Полученные результаты подтверждают возможность аппаратного задания топологии базы правил нечеткого вывода и реализацию вычислений в памяти (in-memory computing). Это открывает перспективы для внедрения периферийного искусственного интеллекта (Edge AI) непосредственно в горячие зоны промышленного оборудования.

**Ключевые слова:** тепловая память, нечеткая логика, аппаратный логический вывод, фазификация, вычисления в памяти, кремниевые структуры

**Благодарности.** Авторы выражают признательность доктору физико-математических наук, профессору Каленкову С.Г. и доктору технических наук, профессору Бескопильному А.Н. за стимулирующие дискуссии. Также благодарим редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда РФ № 25-79-10123.

**Для цитирования.** Володина О.В., Скворцов А.А., Рыбакова М.Р., Корячко М.В. Аппаратная реализация нечеткой логики на базе элементов тепловой памяти для отказоустойчивого управления в машиностроении. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2661. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2661>

*Original Empirical Research*

## Hardware Implementation of Fuzzy Logic Based on Thermal Memory Elements for Fault-Tolerant Control in Mechanical Engineering

Olga V. Volodina<sup>1</sup> , Arkadiy A. Skvortsov<sup>1</sup>  , Margarita R. Rybakova<sup>1</sup>, Marina V. Koryachko<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Russian Technological University — MIREA, Moscow, Russian Federation

 [skvortsovaa2009@yandex.ru](mailto:skvortsovaa2009@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** The automation of high-temperature processes (for example, laser welding) requires fault-tolerant real-time control systems. Traditional microprocessors exhibit critical software latencies, while promising in-memory computing platforms (MRAM, RRAM) are subject to thermal instability and state drift in hot zones. There is a significant scientific gap in the development of controllers capable of utilizing heat transfer physics as a computational medium, thereby converting thermal interference into a useful logic signal. This study is aimed at the computer modeling of heat flows in thermal memory elements (TME) to justify the hardware implementation of fuzzy logic inference. The research addresses the tasks of the topological formation of AND/OR logic gates and the analysis of the impact of dielectric insulation on the weight parameter adjustment.

**Materials and Methods.** The investigation of thermal processes in memory cells (a 2–5 μm aluminum film on a silicon substrate) was conducted by the finite element method in the Transient Thermal module of ANSYS Workbench. The cells were fabricated via vacuum electron-beam evaporation: aluminum tracks 75 μm wide and 4 mm long were formed on the silicon substrate. The structures were subjected to rectangular current pulses with a current density amplitude of  $(2–2.5) \cdot 10^{10}$  A/m<sup>2</sup> and a duration of 1–2 ms; the local heating of the structures reached up to 30°C. To implement AND and OR logic gates, the interelement distances were topologically varied to 0.1 mm and 0.5 mm, respectively. Furthermore, SiO<sub>2</sub> dielectric pockets with a depth of 30 μm were introduced into the design for directional heat flow control.

**Results.** Based on the developed computer models in ANSYS Workbench, a comprehensive study of non-stationary thermal fields in TME structures was conducted. It is proven that the integration of SiO<sub>2</sub> dielectric insulation effectively controls the direction and power of the heat flow, eliminating parasitic energy dissipation. The modeling physically substantiates the feasibility of hardware formation of a fuzzy inference rule base directly within the crystal topology. It is established that varying the interelement distances is the key factor in logic setting: a distance of 0.1 mm between the input and output elements provides the realization of the OR logic operation, whereas a 0.5 mm distance corresponds to the AND operation.

**Discussion.** The data obtained confirm that thermal field superposition enables delay-free fuzzy logic operations. The logic gate models developed exhibit response times (1–2 ms) that are an order of magnitude lower than those of standard PLC (20–50 ms). In contrast to phase-change memory (PCM), the proposed method demonstrates robustness against external temperature noise through the algorithmic correction of logic thresholds. The primary limitation of this study is the thermal inertia of the silicon substrate, which accounts for a 5–7% discrepancy between the ANSYS simulation results and in-situ experiments.

**Conclusion.** The findings validate the feasibility of hardware-based topological design for a fuzzy inference rule base and the practical implementation of in-memory computing. This opens up promising prospects for integrating peripheral artificial intelligence (Edge AI) directly into the hot zones of industrial equipment.

**Keywords:** thermal memory, fuzzy logic, hardware fuzzy inference, fuzzification, in-memory computing, silicon structures

**Acknowledgments.** The authors would like to thank Professor S.G. Kalenkov, Dr.Sci. (Physics-Mathematics), and Professor A.N. Beskopylny, Dr.Sci. (Engineering), for stimulating discussions. We also appreciate the Journal editorial team and the reviewer for their professional assessment and valuable recommendations for improving the article.

**Funding Information.** This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-79-10123.

**For Citation.** Volodina OV, Skvortsov AA, Rybakova MR, Koryachko MV. Hardware Implementation of Fuzzy Logic Based on Thermal Memory Elements for Fault-Tolerant Control in Mechanical Engineering. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2661. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2661>

**Введение.** Современный этап развития глобального машиностроения, который характеризуется переходом к концепциям Industry 4.0 и 5.0, предъявляет высокие требования к надежности систем автоматизации [1]. Технологические процессы, например, высокоточное литье, лазерная и электронно-лучевая сварка, а также многоступенчатая термическая обработка, протекают в условиях воздействия экстремальных факторов: высокоинтенсивных электромагнитных полей, вибрационных нагрузок и сверхвысоких температурных градиентов. В условиях экстремальных температурных полей и электромагнитных помех традиционная микропроцессорная архитектура фон Неймана демонстрирует критическое снижение эффективности [2, 3]. До 80 % времени и энергии вычислительного цикла ПЛК затрачивается на пересылку данных по уязвимым шинам, что формирует задержку отклика до 20–50 мс. Стандартные микропроцессоры требуют громоздких систем защиты и экранирования от электромагнитных помех. Более того, реализация интеллектуальных алгоритмов управления, в частности нечеткой логики (Fuzzy Logic), в программном виде сопряжена с критическими задержками, которые возникают из-за многократного преобразования сигналов в цепи «аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — процессор — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)» и последовательного выполнения программного кода микроконтроллера. Алгоритмы управления высокоскоростными производственными системами должны работать без задержек [4], поэтому необходимо использовать параллельные аппаратные вычислители, где логический вывод не зависит от тактовой частоты центрального процессора. Переход к альтернативным платформам вычислений в памяти (In-Memory Computing, IMC) позволит обрабатывать сигналы непосредственно в физической среде (in situ).

Одно из возможных направлений реализации алгоритма вычислений в памяти является создание многозначных логических схем [5], которые позволят реализовать нечеткую логику схемотехнически, через изменение физических свойств материала, таких как сопротивление или теплопроводность. Наиболее изученным термическим способом реализации IMC является память на фазовых переходах (импульсно-кодовая модуляция, Pulse Code Modulation, PCM) [6], алгоритм работы которой основан на кодировании информации через изменение агрегатного состояния халькогенидного стекла в результате повышения температуры при нагреве. Но необходимо учитывать, что использование PCM в горячих цехах (например, в зоне лазерной сварки) сталкивается с проблемой самопроизвольного переключения фаз из-за высокого внешнего теплового фона, что делает их непригодными для систем экстренной защиты.

В качестве базовых элементов аппаратной нечеткой логики второго типа рассматриваются и мемристорные структуры (RRAM) [7], для которых характерны такие же проблемы. Мемристорные кроссбары подвержены термическому дрейфу резистивных состояний, что приводит к накоплению ошибок в весовых коэффициентах нечеткого вывода. Логичным продолжением выступает область термотроники [8] (фононики [9]). Были проведены эксперименты, которые продемонстрировали работу наноразмерных тепловых логических вентилях (NOT, AND, OR) с энергопотреблением порядка фемтоджоуля [10]. Изучение волновых термопластических логических вентилях, построенных с использованием термически настраиваемых метаматериалов, привело к выводу о возможности создания сверхсложных комбинируемых схем, встроенных непосредственно в конструкционный материал [11]. Но данные решения носят исключительно лабораторный характер: они работают на наномасштабном уровне и требуют качественной изоляции от макроскопического теплового шума.

Таким образом, в современном научном знании наблюдается явный пробел: существующие твердотельные решения (PCM, RRAM) чувствительны к внешним тепловым помехам, а нанофононные устройства не масштабируемы для промышленных условий. Решением этой проблемы может стать разработка макроскопических элементов тепловой памяти (ЭТП), которые используют само наложение тепловых потоков для вычислений, превращая вредный перегрев оборудования в полезный сигнал.

В отличие от классической электроники тепловая память использует динамический диапазон нагрева [12] как аналоговую величину. Динамическое изменение температуры ЭТП напрямую отображает функции принадлежности нечетких множеств. Таким образом, элемент тепловой памяти не просто становится устройством хранения, а превращается в активную вычислительную среду, реализующую алгоритмы нечеткой логики второго типа.

В отличие от классических алгоритмов нечеткая логика второго типа (Type-2 Fuzzy Logic) оперирует функциями принадлежности, которые сами по себе являются нечеткими множествами. Степень принадлежности здесь — это не конкретное число, а диапазон (интервал). Алгоритмы нечеткой логики могут напрямую обрабатывать лингвистические переменные и выполнять интуитивный процесс принятия решений, подобный человеческому [13], что позволит использовать их в системах отказоустойчивого управления (Fault-Tolerant Control Systems, FTCS) [14].

Целью данной работы является разработка метода аппаратной реализации нечеткого логического вывода на базе структур тепловой памяти. Предложенный метод позволит объединить преимущества термической стабильности, помехозащищенности системы и интеллектуальной обработки данных в решении задачи по созданию отказоустойчивых систем управления нового поколения для современного машиностроения.

**Материалы и методы.** Рассматриваемые в работе элементы тепловой памяти представляют собой структуры типа «металлическая пленка — кремниевая подложка». В отличие от традиционных цифровых ячеек памяти эти элементы хранят информацию в тепловом состоянии. Как активная вычислительная среда, они интегрируют хранение, обработку и нечеткую логику в одной ячейке, проявляя сильную чувствительность к подводимой энергии. Токковые импульсы служат входными сигналами: распределение тепла от локального нагрева реализует операции типа AND/OR. Это позволяет создавать нейроморфные сети без транзисторов для распознавания откликов с энергоэффективностью до  $10^{-15}$  Дж/операция.

Именно поэтому в качестве ячейки тепловой памяти авторами использовались структуры, представляющие собой дорожки металлизации, напыленные методом электронно-лучевого испарения на кремниевую пластину (рис. 1). В качестве подложки использовалась кремниевая пластина толщиной 450 мкм и удельным сопротивлением 30 Ом·см. В роли токоведущего слоя использовались алюминиевые пленки толщиной  $h = 3-5$  мкм. Ширина дорожки металлизации  $b = 75$  мкм, а её длина  $l = 4$  мм. Зонды (1–12) использовались для регистрации осциллограмм в процессе прохождения токовых импульсов [12]. Одиночные токовые импульсы формировались с помощью оригинальной установки. Длительность прямоугольного токового импульса не превышала  $\tau = 1$  мс, а амплитуда  $j = 8 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>. Омическое сопротивление структуры находилось в диапазоне  $R = 0,3-0,5$  Ом.

Результаты предварительных исследований показали, что данная система хорошо работает до температуры  $T = 550$  °С. Дальнейшее увеличение тепловых нагрузок приводит к началу деградационных процессов. Они связаны с процессами контактного плавления на межфазной границе Al–Si ( $T_c = 577$  °С) и с процессами электродиффузии, приводящими к необратимым изменениям в структуре металлической дорожки [15].

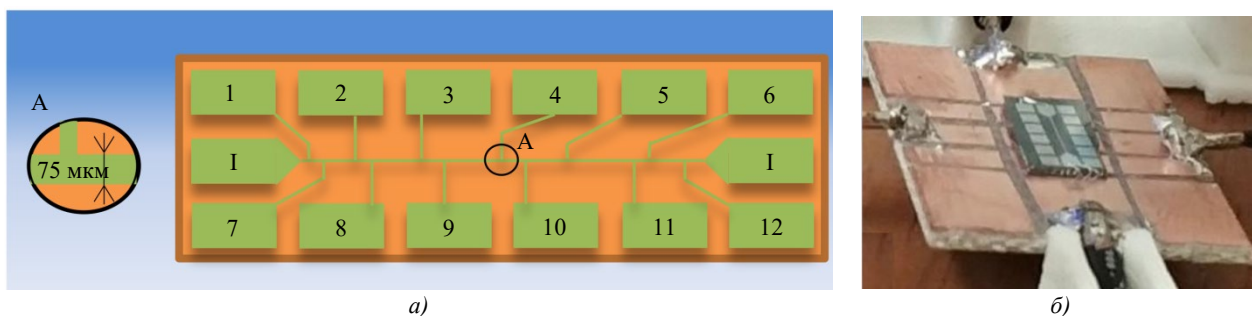


Рис. 1. Аппаратная реализация ячейки тепловой памяти: *a* — схематическое представление; *б* — экспериментальная электрофизическая установка

Для проведения вычислительного эксперимента и оценки пространственного распределения тепловых полей применялся метод конечных элементов в модуле Transient Thermal платформы ANSYS Workbench. Численное решение путем построения тепловой модели на основе метода конечных элементов в системе инженерного анализа ANSYS показало себя как эффективный подход для расчета температурных полей различных объектов машиностроения [16].

Трёхмерная геометрическая модель (рис. 2) включала в себя монокристаллическую кремниевую подложку толщиной 2 мм, на поверхности которой располагались токоведущие дорожки из алюминия (длина — 4 мм, ширина — 75 мкм, толщина — 3 мкм), выполняющие функцию ЭТП. Для направленного управления тепловым потоком и исключения взаимного влияния входных элементов в структуру были интегрированы диэлектрические теплоизолирующие карманы из диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) глубиной 30 мкм и толщиной 1 мкм.

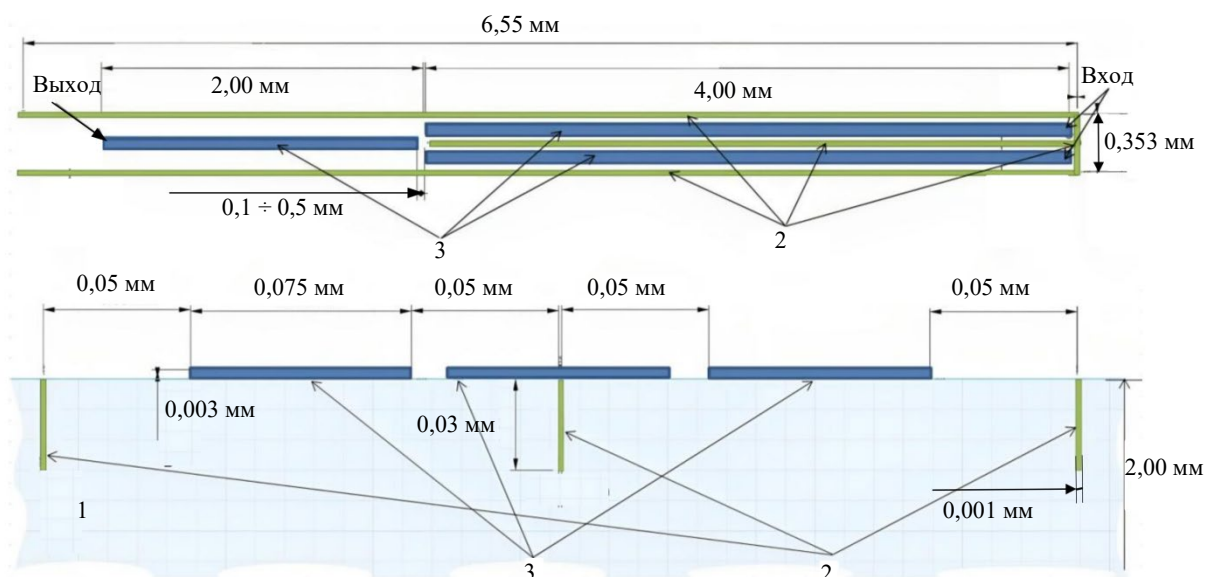


Рис. 2. Геометрия структуры логического вентиля: 1 — кремниевая пластина; 2 — изолирующие слои диэлектрика; 3 — металлические дорожки

При настройке решателя (Solver) задавались следующие термодинамические свойства материалов:

1. Кремний (Si): плотность —  $2330 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность —  $148 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , удельная теплоемкость —  $712 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ .
2. Диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ): плотность —  $2220 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность —  $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , удельная теплоемкость —  $745 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ .
3. Алюминий (Al): плотность —  $2689 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность —  $237,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , удельная теплоемкость —  $951 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ .

Генерация расчетной неструктурированной сетки производилась во встроенном модуле ANSYS Meshing (рис. 3).



Рис. 3. Изображение построенной сетки на модели кремниевой пластины с элементом тепловой памяти в диэлектрическом кармане шириной 100 мкм

В качестве граничных условий на свободных поверхностях кремниевой пластины задавался конвективный теплообмен с окружающей средой при коэффициенте теплоотдачи  $5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ . Тепловое воздействие моделировалось путем задания распределенной по объему алюминиевых дорожек мощности тепловыделения. Логика работы вентиля проверялась путем оценки температуры на выходном ЭТП при варьировании дистанции теплового зазора (от 0,1 до 0,5 мм).

Для использования данной физической структуры в качестве вычислителя нечеткой логики должна быть установлена прямая связь между теплофизическими процессами и математическим аппаратом нечетких множеств. Чтобы установить аппаратное соответствие между конкретным численным значением входной переменной (сигналом от датчика температуры) и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной (термов «логический 0», «логическая 1», «критический перегрев») проведена процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе четких исходных данных — процесс фаззификации.

*Фаззификация и формирование веса входного воздействия.* В разработанной архитектуре ЭТП входные электрические импульсы от датчиков преобразуются в локальные тепловые поля непосредственно в структуре «алюминиевая дорожка — кремниевая подложка». Ключевым параметром на данном этапе выступает вес входного воздействия. Если в классических программных алгоритмах вес задается абстрактным числовым коэффициентом, то в предлагаемой аппаратной реализации он имеет определенный физический смысл, характеризует промежуточное состояние системы между логическими 0 и 1. Вес определяется количеством выделяемой тепловой энергии (мощностью теплового потока), которая зависит от амплитуды протекающего импульса тока ( $2 \cdot 10^{10} < I_m < 2,5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ ) и его длительности (1–2 мс). Чем выше значения этих электрических параметров, тем интенсивнее локальный джоулев нагрев элемента. Физическое повышение температуры ЭТП эквивалентно математическому росту степени принадлежности входной переменной к нечеткому терму «логическая 1». Таким образом, динамика температуры  $T(t)$  ЭТП выступает аналоговым носителем информации о принадлежности к нечеткому множеству.

Таким образом, определив степени принадлежности нескольких входных воздействий, система должна выполнить операцию логического вывода результата аппаратного вычисления, т. е. сформировать результирующее значение на основе базы правил. В отличие от микропроцессоров, где логический вывод требует ресурсоемких математических вычислений, в матрице ЭТП эта процедура реализуется на аппаратном уровне за счет сложения тепловых потоков в объеме кремниевой подложки. Для нивелирования неконтролируемого взаимного влияния элементов тепловой памяти и задания жестких правил вывода (формирования топологии базы правил) используются диэлектрические карманы из оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) (рис. 2).

Диэлектрические карманы выступают в роли тепловых барьеров, строго направляя тепловые потоки к весовому (выходному) элементу матрицы для выполнения операций пересечения или объединения.

*Реализация аппаратных операций пересечения AND и объединения OR.* Для создания отказоустойчивых систем управления, реализующих аппаратную нечеткую логику непосредственно в структуре запоминающего устройства, авторами исследованы механизмы управления пространственным распределением тепловых полей. В программном комплексе SolidWorks построены 3D-модели, демонстрирующие топологическую аппаратную реализацию логических операций AND и OR на базе элементов тепловой памяти (ЭТП).

*Операция OR (MAX / Объединение).* Реализуется при минимальном расстоянии между элементами (0,1 мм) (рис. 4, 5). Тепловой мощности даже одного нагретого входа в условиях локализованного карманами теплового потока достаточно для переключения выходного элемента в состояние «логической 1» (нагрев на  $\approx 2^\circ\text{C}$ ), что соответствует фиксации критического события по любому из каналов.

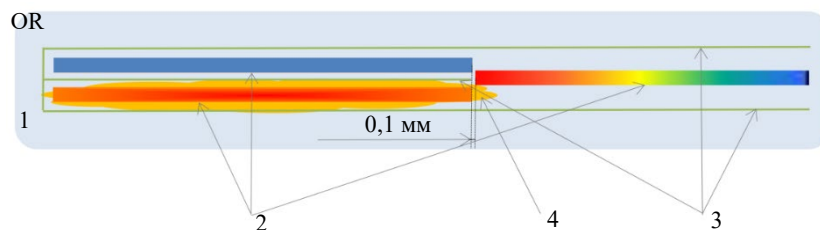


Рис. 4. Аппаратная реализация операции OR, расстояние между входными и выходным элементами — 0,1 мм:

- 1 — кремниевая пластина; 2 — металлические дорожки;
- 3 — изолирующие слои диэлектрика; 4 — направление распространения тепла

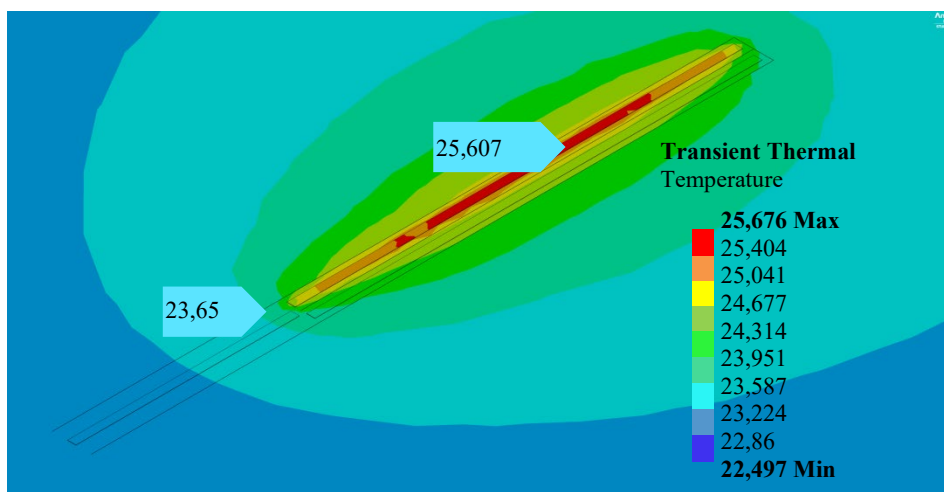


Рис. 5. Имитационная модель логического вентиля OR: температурное поле при дистанции 0,1 мм между входными и выходным ЭТП (нагрев одного входного элемента)

Операция AND (MIN / Пересечение). Реализуется при увеличении расстояния до 0,5 мм (рис. 6, 7). В этом случае выходной элемент достигает порога срабатывания только при одновременном нагреве обоих входов, что физически эмулирует пересечение условий (например, «высокая температура» и «длительное время воздействия»).

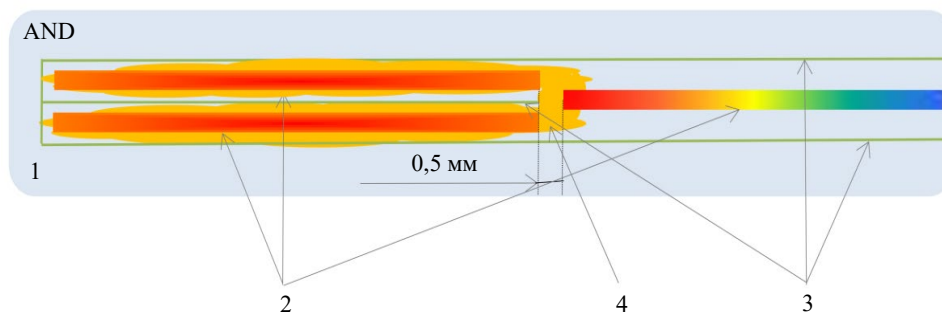


Рис. 6. Аппаратная реализация операции AND, расстояние между входными и выходным элементами — 0,5 мм:

- 1 — кремниевая пластина; 2 — металлические дорожки;  
3 — изолирующие слои диэлектрика, 4 — направление распространения тепла

Имитационное моделирование работы логических вентилях AND проведено на платформе ANSYS Workbench (рис. 5, 7) с использованием модуля Transient Thermal для нестационарных тепловых расчетов.

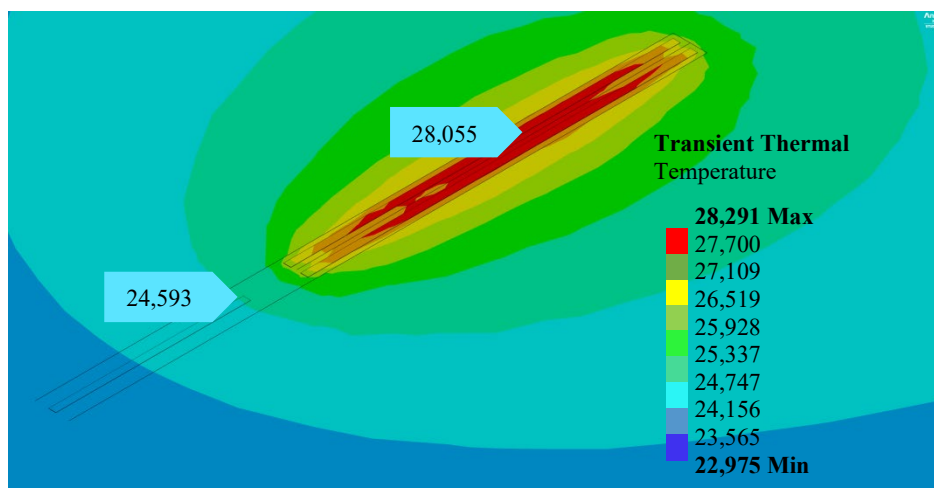


Рис. 7. Имитационная модель логического вентиля AND: температурное поле при дистанции 0,5 мм между входными и выходным ЭТП (одновременный нагрев двух входных элементов)

Результаты моделирования (рис. 5, 7) полностью подтвердили эффективность использования тепловой изоляции ( $\text{SiO}_2$ ) и выбранных геометрических дистанций для настройки весовых параметров аппаратного нечеткого вывода.

**Результаты исследования.** В ходе проведенного исследования теоретически обоснована концепция аппаратной реализации нечеткого логического вывода на базе элементов тепловой памяти (ЭТП). Установлено, что применение планарной системы металлизации на кремниевой подложке позволит обойти аппаратные ограничения классической архитектуры фон Неймана за счет переноса процессов фазификации и дефазификации напрямую в физическую среду полупроводника.

Результаты компьютерного моделирования в среде ANSYS Workbench подтвердили, что предложенная пространственная организация наложения тепловых полей внутри материала позволит успешно выполнить базовые операции нечеткой логики. Определено, что возможность задавать топологию базы нечетких правил дает прецизионное пространственное взаиморасположение матрицы ЭТП и использование изолирующих диэлектрических карманов из оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Найдены оптимальные линейные размеры между входными ЭТП и выходным весовым ЭТП: дистанция между элементами в 0,1 мм гарантирует выполнение операции объединения (логическое ИЛИ / OR), а увеличение теплового зазора до 0,5 мм устанавливает правила для операции пересечения (логическое И / AND), переключая выходной элемент только при совместном тепловом воздействии.

Результаты моделирования доказывают, что аппаратная реализация нечеткой логики на базе ЭТП позволит преодолеть ограничения классических микропроцессорных систем в задачах автоматизации быстропротекающих процессов.

Время реакции разработанных моделей логических вентилях — 1–2 мс, для сравнения цикл обработки нечетких алгоритмов стандартными ПЛК обычно составляет 20–50 мс. Использование макроскопического теплопереноса в качестве полезного сигнала отличает предложенные ЭТП от технологий РСМ (памяти на фазовых переходах), склонных к самопроизвольному переключению под внешним тепловым фоном. В отличие от мемристорных структур (RRAM) ЭТП более устойчивы к температурному дрейфу состояний в горячих зонах за счет применения оригинального алгоритма плавающего нуля.

**Обсуждение.** Результаты проведенного исследования имеют практическую значимость в области отказоустойчивого управления технологическим процессом (ТП) автоматизированной лазерной (или электронно-лучевой) сварки тонкостенных конструкций. Данный ТП характеризуется высокой скоростью протекания теплофизических реакций (миллисекундный диапазон) и наличием электромагнитных помех от силовых инверторов, что делает применение классических микропроцессоров для нечеткого контроля невозможным без специальных методов защиты.

Критическим нарушением данного ТП является образование дефектов сварного шва (прожог, испарение легирующих элементов или критические термические напряжения). Для предотвращения брака необходимо одновременно контролировать два параметра: температуру сварочной ванны (определяемую бесконтактным пирометром) и время удержания этой температуры (или тока накачки лазера).

Отказоустойчивое управление данным технологическим процессом возможно построить на базе аппаратной реализации логического вентиля AND, представляющего собой трехэлементную структуру тепловой памяти: два входных ЭТП (вход А — температурный фактор, вход Б — временной или мощностной фактор) и один выходной (весовой) элемент, формирующий команду на корректировку или экстренный останов процесса (рис. 8).

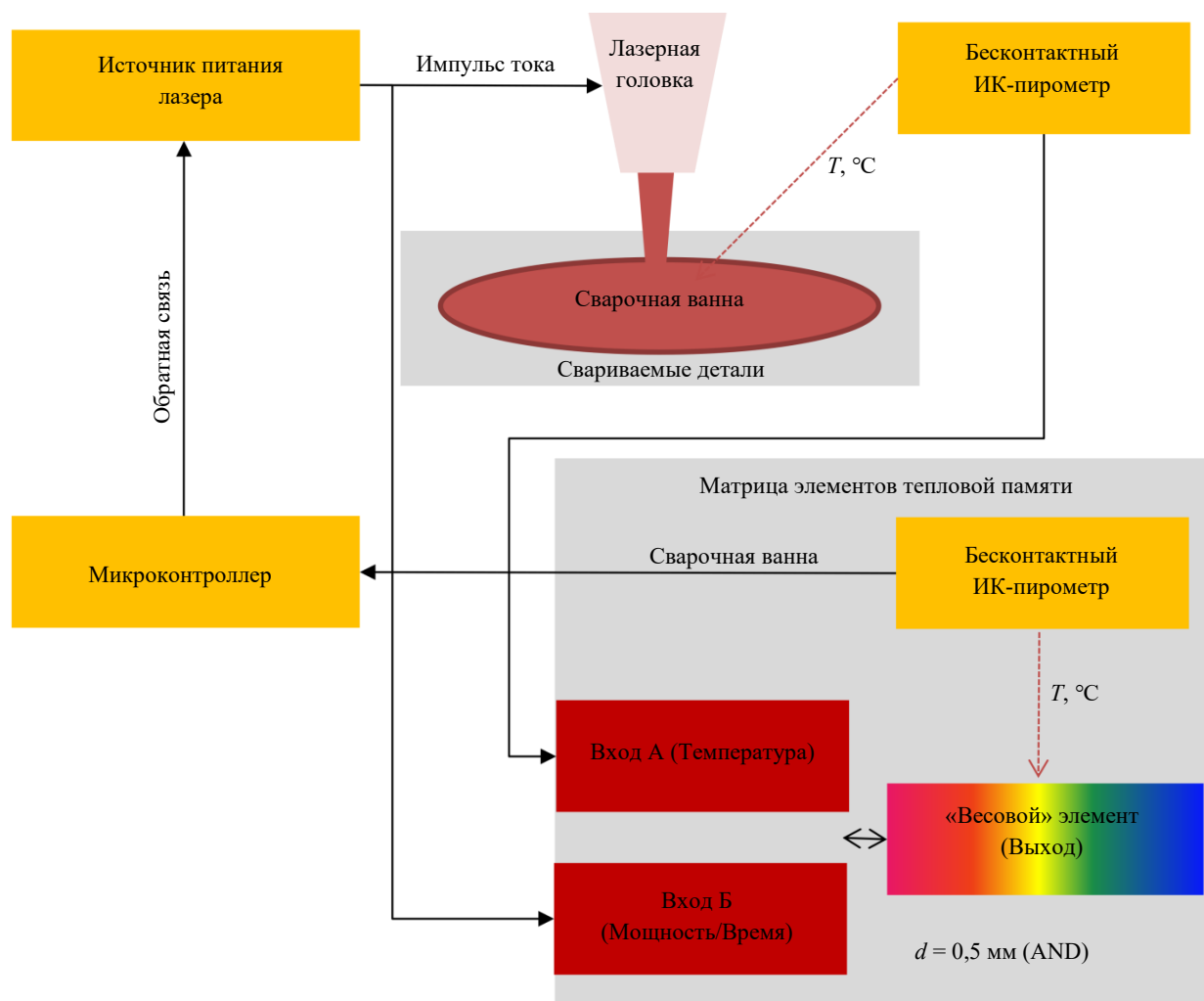


Рис. 8. Схема интеграции отказоустойчивого вычислителя на базе ЭТП в процесс лазерной сварки

Высокая скорость отклика объясняется отсутствием этапов аналого-цифрового преобразования — логический вывод происходит непосредственно в физической среде. Реализованный вентиль AND (на базе трехэлементной структуры) физически суммирует факторы мощности лазера и температуры сварочной ванны, что позволяет интерпретировать тепловое состояние системы как лингвистическую переменную.

Интеграция активной вычислительной среды в ТП лазерной сварки позволит решить следующие проблемы:

- предотвратить необратимые нарушения техпроцесса (деградацию микроструктуры шва, термические повреждения или сквозной прожог);
- провести корректировку подачи энергии за 1–2 мс;
- матрица ЭТП даст возможность реализовать парадигму периферийных вычислений (Edge Computing) непосредственно в горячей зоне ТП. Это разгрузит промышленные сети передачи данных и исключит задержки (latency) при принятии критических решений.

Аппаратная реализация нечеткой логики на ЭТП решает задачи высокотемпературной диагностики в условиях горячих цехов (например, литейного производства), где классические полупроводниковые контроллеры неизбежно выходят из строя или принудительно отключаются встроенными системами защиты от перегрева [17].

Основным ограничением работы ЭТП является тепловая инерционность кремниевой подложки, которая обуславливает расхождение между результатами моделирования в ANSYS и натурными экспериментами на уровне 5–7 %. Также следует учитывать, что предложенный метод ориентирован на высокоскоростную пороговую логику (защита от брака) и не заменяет высокоточные системы числового программного управления.

**Заключение.** В ходе исследования обоснован метод аппаратной реализации нечеткого логического вывода на базе элементов тепловой памяти (ЭТП) для систем промышленной автоматизации.

1. Разработаны метод организации хранения информации и алгоритм плавающего нуля, обеспечивающие адаптивную коррекцию логических порогов. Это позволяет стабилизировать работу логических ячеек в условиях нестационарного температурного фона, характерного для производственных цехов.

2. С помощью имитационного моделирования доказана возможность формирования базы правил нечеткого вывода топологическим способом. Установлено, что варьирование межэлементного расстояния в кремниевой структуре (0,1 мм для операции OR и 0,5 мм для AND) позволяет эмулировать логические операции непосредственно за счет распределения тепловых полей.

3. Обоснована эффективность применения ЭТП в качестве периферийных вычислительных звеньев в зонах экстремальных воздействий. Показано, что использование предложенных структур сокращает время реакции системы на тепловое событие до 1–2 мс, что достаточно для предотвращения прожогов и дефектов при лазерной сварке.

Перспективы дальнейших исследований. Основываясь на успешной аппаратной реализации базовых логических вентилях (AND/OR), дальнейшие исследования целесообразно развивать в следующих направлениях.

1. Масштабирование вычислительной архитектуры: переход от единичных логических вентилях к топологическому синтезу многомерных матриц ЭТП. Это позволит аппаратно реализовать комплексные базы правил нечеткого вывода, оперирующие тремя и более входными лингвистическими переменными для многокритериального управления процессом. Как показывают современные исследования, многокритериальная оптимизация с учетом противоречащих друг другу критериев (например, поиск оптимальной температуры) востребована для повышения качества продукции и эффективности сложных химических реакций. Аппаратная реализация позволит перенести подобные многокритериальные вычисления непосредственно в физическую среду оборудования.

2. Оптимизация быстродействия системы: поскольку в ходе моделирования была выявлена погрешность в 5–7 %, обусловленная тепловой инерционностью кремниевой подложки, перспективной задачей является исследование альтернативных диэлектрических материалов и топологий (например, локальное утонение подложки). Это позволит минимизировать паразитное рассеивание тепла и снизить время реакции контроллера до субмиллисекундного диапазона.

3. Полунатурное HiL-моделирование (Hardware-in-the-Loop): проведение испытаний, при которых физический макет отказоустойчивого вычислителя на базе ЭТП будет интегрирован в контур управления цифрового двойника реального технологического оборудования. Это даст возможность оценить робастность предложенной архитектуры (Edge AI) в условиях генерации реальных высокочастотных электромагнитных помех от силовых сварочных инверторов.

#### Список литературы / References

1. Praveen Kumar Reddy Maddikunta, Quoc Viet Pham, Prabadevi B, N Deepa, Kapal Dev, Thippa Reddy Gadekallu, et al. Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022;26:100257. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>
2. Hao Wang, Bin Sun, Shuzhi Sam Ge, Jie Su, Ming Liang Jin. On Non-Von Neumann Flexible Neuromorphic Vision Sensors. *Npj Flex Electron*. 2024;8:28. <https://doi.org/10.1038/s41528-024-00313-3>

3. Zhou Wenjun, Zhu Chuan, Ma Jianmin. Single-Layer Folded RNN for Time Series Prediction and Classification under a Non-Von Neumann Architecture. *Digital Signal Processing*. 2024;147:104415. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.104415>
4. Nada AA, Bayoumi MA. Development of Embedded Fuzzy Control Using Reconfigurable FPGA Technology. *Automatika*. 2024;65(2):609–626. <https://doi.org/10.1080/00051144.2024.2313904>
5. Jiayang Wang, Yuzhe Lin, Chenhao Hu, Shiqi Zhou, Shenyu Gu, Mengjie Yang, et al. A Kind of Optoelectronic Memristor Model and Its Applications in Multi-Valued Logic. *Electronics (MDPI)*. 2023;12(3):646. <https://doi.org/10.3390/electronics12030646>
6. Sebastian A, Le Gallo M, Khaddam-Aljameh R, Eleftheriou E. Memory Devices and Applications for In-Memory Computing. *Nature Nanotechnology*. 2020;15:529–544. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0655-z>
7. Haghzad Klidbary S, Javadian M, Omid R, Hasanzadeh RPR. Memristor Crossbar-Based Hardware Implementation of Type-2 Fuzzy Membership Function and On-Chip Learning. *International Journal of Engineering*, 2021;34(9):2180–2188. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.09c.15>
8. Ben-Abdallah Ph, Biehs S-A. Thermotronics: Towards Nanocircuits to Manage Radiative Heat Flux. *Zeitschrift fur Naturforschung A*. 2016;72(2):151–162 <https://doi.org/10.1515/zna-2016-0358>
9. Lei Wang, Baowen Li. Thermal Memory: A Storage of Phononic Information. *Physical Review Letters*. 2008;101:267203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.267203>
10. Hui Wang, Noordzij N, Mikhailov M, Steinhauer S, Descamps Th, Oksenberg E, et al. Attojoule Superconducting Thermal Logic and Memories. *Nano Letters*. 2025;25(11):4401–4407. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c06545>
11. Fort E, Mousa M, Nouh M. Thermoelastic Wave-Based Logic for Mechanically Cognitive Materials. *arXiv:2511.00647*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.00647>
12. Skvortsov AA, Pshonkin DE, Volodina OV, Nikolaev VK. Metallization System as a Part of Thermal Memory. *Heliyon*. 2023;9(5): e15797. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15797>
13. Haziqah B, Idris A. Temperature Control in a Shower Using Fuzzy Logic. *Proceedings of Science and Mathematics*. 2024;24:56–64.
14. Riaz U, Amin AA, Tayyeb M. Design of active fault-tolerant control system for Air-fuel ratio control of internal combustion engines using fuzzy logic controller. *Science Progress*. 2022;105(2):1–29. <https://doi.org/10.1177/00368504221101962>
15. Kulchin YuN, Skvortsov AA, Nikolaev VK, Volodina OV. Development of Thermal Memory Cells on Silicon Using the Floating Zero Algorithm. *Scientific Reports*. 2025;15:5184. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89566-0>
16. Alexandrova AA, Koledin SN. Optimal Temperature Calculation for Multicriteria Optimization of the Hydrogenation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by NSGA-II Method. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024; 24(1):109–118. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-109-118>
17. Васильев А. Светодиодные светильники для горячих цехов. (*Электротехнический рынок*). 2025;(2):62–65. Vasiliev A. LED Luminaires for Hhot Shops. *Electrical Engineering Market Magazine*. 2025;(2):62–65. (In Russ.)

#### Об авторах:

**Ольга Вячеславовна Володина**, старший преподаватель кафедры «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета (107023, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [moosbeere\\_O@mail.ru](mailto:moosbeere_O@mail.ru)

**Аркадий Алексеевич Скворцов**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета (107023, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [skvortsovaa2009@yandex.ru](mailto:skvortsovaa2009@yandex.ru)

**Маргарита Рушановна Рыбакова**, доцент кафедры «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета (107023, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), [sopr\\_kaf@mospolytech.ru](mailto:sopr_kaf@mospolytech.ru)

**Марина Валерьевна Корячко**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика-3» МИРЭА — РТУ (119454, Российская Федерация, г. Москва, пр. Вернадского, 78), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [m.v.koryachko@gmail.com](mailto:m.v.koryachko@gmail.com)

***Заявленный вклад авторов:***

**О.В. Володина:** концептуализация, методология, программное обеспечение, проведение исследования, разработка алгоритма плавающего нуля, написание черновика рукописи, визуализация.

**А.А. Скворцов:** научное руководство, концептуализация, методология, валидация результатов, написание рукописи.

**М.Р. Рыбакова:** формальный анализ, проведение исследования.

**М.В. Корячко:** формальный анализ, валидация результатов.

***Конфликт интересов:*** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.***

***About the Authors:***

**Olga V. Volodina**, Senior Lecturer of the Department of Dynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [moosbeere\\_O@mail.ru](mailto:moosbeere_O@mail.ru)

**Arkadiy A. Skvortsov**, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Dynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [skvortsovaa2009@yandex.ru](mailto:skvortsovaa2009@yandex.ru)

**Margarita R. Rybakova**, Senior Lecturer of the Department of Dynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), [sopr\\_kaf@mospolytech.ru](mailto:sopr_kaf@mospolytech.ru)

**Marina V. Koryachko**, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics-3, Russian Technological University — MIREA (78, Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [m.v.koryachko@gmail.com](mailto:m.v.koryachko@gmail.com)

***Claimed Contributorship:***

**OV Volodina:** conceptualization, methodology, software, investigation, “floating zero” algorithm development, writing – original draft preparation, visualization.

**AA Skvortsov:** supervision, conceptualization, methodology, validation, writing.

**MR Rybakova:** formal analysis, investigation, writing.

**MV Koryachko:** formal analysis, validation, writing.

***Conflict of Interest Statement:*** the authors declare no conflict of interest.

***All authors have read and approved the final version of manuscript.***

**Поступила в редакцию / Received** 10.03.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 17.04.2026

**Принята к публикации / Accepted** 07.05.2026