

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 3 (75)

2025

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>Бождай А. С., Горшенин Л. Н.</i> Математическая модель интегрального критерия классификации и алгоритм формирования его графического представления	5
<i>Носков С. И., Беляев С. В., Чекалова А. Р.</i> Оценивание параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска	17
<i>Петушков Г. В., Сигов А. С.</i> Формализация и реализация логико-вероятностных и логико-алгебраических операционных моделей функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем	26
<i>Хворов Р. А., Скрыль К. С., Корчагин И. И., Амелина К. Е.</i> Методология функционального моделирования как инструмент разработки адекватных математических моделей процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах	63
<i>Хворов Р. А., Скрыль К. С., Корчагин И. И., Амелина К. Е., Гайфулин В. В., Савельев И. В.</i> Функциональная модель этапа доступа к отдельному средству вычислительной техники в процессе вирусной атаки в компьютерных системах	74
<i>Данилов А. В., Макарычев П. П.</i> Комбинаторный алгоритм назначения целей	86
<i>Чепига А. А.</i> Математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов	100

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

<i>Зуев С. М., Константинов И. Ю.</i> Калибровка оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков	112
<i>Корнюшкин Д. А.</i> Метод управления системой орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе при помощи нейросетевого регулятора	125

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Воронов Р. Д., Семдянов И. Н., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Теоретическое исследование влияния предварительно напряженных армирующих элементов на жесткость и демпфирование композитных порталных конструкций для металлорежущих малогабаритных станков.....	134
Воячек И. И., Кочетков Д. В., Низов О. А. Определение несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения с применением полимерных анаэробных материалов.....	147
Крюков Д. Б., Кривенков А. О., Гуськов М. С. Аспекты разработки и исследования свойств нового типа броневых гетерогенных материалов на основе алюминия и титана, полученных с применением технологии сварки взрывом	157

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 3 (75)

2025

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

<i>Bozhday A.S., Gorshenin L.N.</i> Mathematical model of the integral classification criterion and the algorithm for forming its graphical representation	5
<i>Noskov S.I., Belyaev S.V., Chekalova A.R.</i> Estimation of parameters for a cluster-based piecewise linear risk regression function	17
<i>Petushkov G.V., Sigov A.S.</i> Formalization and implementation of logical-probabilistic and logical-algebraic operational models of the functional architecture of cluster computing systems	26
<i>Khvorov R.A., Skryl' K.S., Korchagin I.I., Amelina K.E.</i> Functional modeling methodology as a tool for developing adequate mathematical models of antivirus protection processes in computer systems	63
<i>Khvorov R.A., Skryl' K.S., Korchagin I.I., Amelina K.E., Gayfulin V.V., Savel'ev I.V.</i> The functional model of stage access to a separate computer hardware in the process of a virus attack in computer systems	75
<i>Danilov A.V., Makarychev P.P.</i> Combinatorial assignment algorithm goals	86
<i>Chepiga A.A.</i> Mathematical model for determining optimal operating conditions of the remote energy supply complex for spatially distributed groups of aerial objects	100

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

<i>Zuev S. M., Konstantinov I. Yu.</i> Calibration of the optical-electronic system based on infrared sensors	112
<i>Kornyushkin D.A.</i> Method of controlling the condenser irrigation system of a refrigeration plant located in a hockey stadium using a neural network controller	125

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

<i>Voronov R.D., Semdyanov I.N., Levashkin D.G., Voronov D.Yu.</i> Theoretical study of influence of prestressed reinforcing elements on stiffness and damping of composite portal structures for metal-cutting small-sized machine tools	134
<i>Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Nizov O.A.</i> Determination of the load-bearing capacity of a combined threaded smooth connection using polymeric anaerobic materials	147
<i>Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Guskov M.S.</i> Aspects of development and research of properties of new type of armor heterogeneous materials based on aluminum and titanium, obtained using explosion welding technology	157

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 004.023

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-1

Математическая модель интегрального критерия классификации и алгоритм формирования его графического представления

А. С. Бождай¹, Л. Н. Горшенин²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹bozhday@yandex.ru, ²gorshenin.lev@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важнейшим методом научного исследования является классификация. Особую сложность представляет задача классификации объектов с гетерогенным пространством информационных признаков, которая на данный момент не имеет унифицированного решения. При этом важно учитывать зависимость результатов классификации от выбранной точки зрения на предметную область – критерия, который определяет состав и типологию значимых признаков рассматриваемых объектов. Целью работы является математическая и алгоритмическая формализация процесса выработки критериев классификации, а также разработка единого формата представления информационных признаков объекта, независимо от их типа, состава и полноты. Это позволит свести задачу классификации к единому автоматизированному процессу – хорошо управляемому, наглядному, поддающемуся машинному обучению и инвариантному к специфике предметной области. *Материалы и методы.* Раскрываются основные проблемы традиционных подходов к решению задачи классификации в условиях динамичности точек зрения на предметную область. Методологической основой работы является теория множеств, методы машинного обучения, нейронные сети, растровая компьютерная графика. *Результаты.* Предложены концепция и формализованное теоретико-множественное представление интегрального критерия классификации, позволяющего алгоритмизировать выбор точек зрения на исследуемую предметную область. Критерии классификации определяют состав значимых признаков объекта. Для его унифицированного представления разработан единый формат в виде растрового графического изображения – графо-хроматической карты, а также алгоритм формирования таких карт. *Выводы.* Предлагаемый подход существенно упрощает процедуру распределения гетерогенных объектов по классам за счет ее приведения к хорошо изученной и отработанной задаче машинного обучения – классификации растровых графических изображений. Формализация интегрального критерия классификации позволяет быстро и удобно задавать различные точки зрения на предметную область, представляя их в виде кортежей данных. Алгоритм формирования графо-хроматических карт обеспечивает получение растровых изображений единого размера и формата для подачи на вход

предобученного нейросетевого классификатора. При этом при изменении точки зрения на предметную область (при изменении числа и состава значимых признаков объектов) не потребуется менять структуру классификатора или производить его переобучение.

Ключевые слова: классификация, методы классификации, критерий классификации, гетерогенные данные, нейронные сети, графо-хроматическая карта, растровое изображение

Для цитирования: Бождай А. С., Горшенин Л. Н. Математическая модель интегрального критерия классификации и алгоритм формирования его графического представления // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 5–16. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-1

Mathematical model of the integral classification criterion and the algorithm for forming its graphical representation

A.S. Bozhday¹, L.N. Gorshenin²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹bozhday@yandex.ru, ²gorshenin.lev@gmail.com

Abstract. *Background.* The most important method of scientific research is classification. The task of classifying objects with a heterogeneous space of information features, which currently has no unified solution, is particularly difficult. It is important to take into account the dependence of classification results on chosen point of view on subject area – a criterion that determines composition and typology of significant features of objects under consideration. The purpose of the work is the mathematical and algorithmic formalization of the process of developing classification criteria, as well as development of a unified format for presenting information features of an object regardless of their type, composition and completeness. This will reduce classification task to a single automated process - well-managed, visual, amenable to machine learning and invariant to specifics of subject area. *Materials and methods.* The work reveals the main problems of traditional approaches to solving the classification problem, in context of dynamic points of view on subject area. Existing works devoted to formalization of classification criteria and problems of choosing significant information features of objects are considered. The methodological basis of the work is set theory, machine learning methods, neural networks and raster computer graphics. *Results.* As a result, a concept and formalized set-theoretic representation of the integral classification criterion are proposed. The criterion allows algorithmization of choice of view's points on the studied subject area. Classification criteria determine composition of significant features of the object. For its unified representation, a single format in the form of a raster graphic image - a graphic-chromatic map, as well as an algorithm for creation of such maps have been developed. *Conclusions.* The proposed approach significantly simplifies the procedure of distributing heterogeneous objects into classes by reducing it to a well-studied and proven task of machine learning - classification of raster graphic images. Formalization of the integral classification criterion allows quickly and conveniently set different points of view on the subject area, representing them in the form of data tuples. The algorithm for forming grapho-chromatic maps provides obtaining raster images of a single size and format for feeding to the input of a pre-trained neural network classifier. At the same time, when changing the point of view on the subject area (i.e. when changing the number and composition of significant features of objects), there is no need to change the structure of the classifier or retrain it.

Keywords: classification, classification methods, classification criterion, heterogeneous data, neural networks, graph-chromatic map, raster image

For citation: Bozhday A.S., Gorshenin L.N. Mathematical model of the integral classification criterion and the algorithm for forming its graphical representation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(3):5–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-1

Введение

Современные научные исследования характеризуются постоянным усложнением и детализацией предметных областей. Это порождает потребность постоянного изменения точки зрения на исследуемые объекты, чтобы охватить и учесть все аспекты изучаемых процессов. Поскольку основным научным методом является классификация, то высокая динамика точек зрения исследователя приводит к принципиальным трудностям распределения объектов с вариативным гетерогенным набором признаков по заранее заданным классам [1–3]. К таким объектам можно отнести: профили пользователей и сообществ в социальных сетях, электронные документы, товары в интернет-магазинах, объекты наблюдения средствами машинного зрения и т.д. Например, классификация документов является одной из ключевых задач для реализации систем электронного документооборота [4]. Задача классификации профилей и сообществ в Интернете актуальна для таргетированной рекламы [5], борьбы с киберугрозами [6], предотвращения преступлений [7]. Классификация товаров требуется в таможенных целях [8], для определения наиболее выгодных рынков сбыта [9]. Классификация наблюдаемых объектов (например, летательных аппаратов) может быть необходима для распознавания целей, радарного мониторинга, противовоздушной обороны [10, 11].

Проблема классификации не имеет однозначного формализованного решения, так как сильно зависит не только от текущего набора значимых признаков объектов, который может изменяться со временем, но и в целом от точки зрения на предметную область. Например, для классификации профилей пользователей по политическим предпочтениям и по социальной активности имеют значение различные наборы признаков. То есть значимость тех или иных признаков сложного объекта зависит от целей классификации. Кроме того, исследователи часто пользуются различными эмпирическими подходами с множеством итераций, на каждой из которых могут обнаруживаться более важные критерии распределения объектов по классам. Изменение набора признаков, по которым проводится классификация, в большинстве случаев требует переобучения классификаторов.

Важной задачей здесь представляется формализация понятия «точка зрения на предметную область». Точка зрения исследователя (фокус его внимания на проблему) может складываться из множества разнородных и зачастую противоречивых факторов. При этом важность отдельных, простых и составных, факторов может постоянно меняться, особенно в сложных предметных областях с огромным количеством целевых состояний и гетерогенных информационных признаков. Для обозначения такой точки зрения, определяющей цели классификации и состоящей из набора признаков, имеющих определенную значимость, предлагается ввести термин «интегральный критерий классификации» (ИКК). Теоретико-множественное представление ИКК позволит разработать аппарат для свертки разнородных информационных признаков объектов предметной области в единое электронное представле-

ние. Однако такое математическое представление плохо подходит для нейросетевых классификаторов, когда нейросеть обучается на основе входных массивов данных. При существенном изменении объема и характера данных (а это неизбежно будет происходить при изменении точки зрения на предметную область), потребуется постоянно переобучать сеть и даже менять ее структуру.

Преодолеть эту проблему возможно путем преобразования разнородной совокупности значимых признаков к единому универсальному представлению, который был ранее описан авторами в работе [12]. В качестве такого универсального представления предложено использовать формат растрового изображения, называемый графо-хроматической картой (ГХК) и состоящий из множества графических примитивов с управляемыми характеристиками. Это позволит решать задачу классификации унифицированным способом, не зависящим от природы классифицируемых объектов, а также от типа и состава их признаков.

Материалы и методы

Существует несколько работ, затрагивающих вопросы формализации критериев классификации, а также проблемы выбора значимых информационных признаков объекта.

Работа [13] американского ученого R. Stepp посвящена «целесоориентированному» подходу к кластеризации и классификации объектов. Модель целей классификации представляется в виде дерева (GDN – Goal Dependency Network) от основных целей к подцелям. На основе этого дерева целей определяется целевой набор классов и критерии для проведения классификации.

Оригинальный подход к классификации, основанный на «точках зрения» изложен в работе [14] B. Selic и A. Pierantonio. Авторы упоминают следующие ограничения традиционной модели классификации:

- сложность учета различных «точек зрения» на классифицируемые сущности;
- сложность учета динамически изменяющегося набора признаков объектов.

В работе [14] «точка зрения» представлена в виде совокупности сведений о рассматриваемых объектах и о классах. Каждый класс имеет информацию о наборе признаков и о множестве значений этих признаков, которые должен иметь объект, чтобы принадлежать этому классу. Каждый объект имеет набор информационных признаков и может рассматриваться с разных точек зрения. UML-диаграмма предлагаемой модели классификации приведена на рис. 1.

Одним из недостатков такой модели является неустранимая проблема сложности процесса классификации при наличии у объектов гетерогенного пространства информационных признаков.

Из всего множества признаков объекта для классификации могут быть важны только некоторые признаки. Из всех признаков рационально выбрать подмножество наиболее значимых для конкретных целей классификации.

Методы выбора признаков для классификации, такие как фильтрующие (filter), обертки (wrapper) и встроенные (embedded) методы, рассмотрены в работах [15, 16].



Рис. 1. Метамоделю подхода к классификации, основанного на «точках зрения»
(перевод на русский на основе англоязычной модели из работы [14])

Особенность фильтрующих методов заключается в обработке отдельных признаков. Их значимость определяется через корреляцию с целевой переменной, но при этом не учитываются взаимосвязи между различными признаками и специфика классификатора. Кроме того, требуются доказательства гипотез зависимости целевой переменной от каждого признака в отдельности.

Методы-обертки рассматривают различные подмножества признаков, оценивая групповое влияние признаков на качество классификации. Недостатком этих методов является резкое возрастание временных и ресурсных затрат при увеличении числа признаков [15].

Embedded-методы встраиваются в структуру классификатора. Это позволяет значительно сократить временные затраты по сравнению с методами-обертками. Но при этом существенно усложняется сам классификатор из-за необходимости встраивания в его структуру дополнительного функционального аппарата выбора признаков.

Для улучшения существующих подходов к выбору признаков и самого процесса классификации предлагается разработать такую модель ИКК, которая будет представлять информационные признаки самой разной природы в одном универсальном формате, инвариантном их типу и количеству. В качестве такого представления предлагается графический растровый формат. Это позволит использовать для классификации сверточные нейронные сети, имеющие множество хорошо зарекомендованных на практике архитектур [17]. Кроме того, можно будет использовать уже обученные модели, дообучив их на предварительно сформированных обучающих наборах ГХК. При этом графический формат достаточно информативен и компактен, что позволит даже на относительно небольших изображениях отображать сведения о

значительном количестве гетерогенных признаков. Для построения модели ИКК используется теоретико-множественный подход, позволяющий группировать любые совокупности объектов различной природы с точки зрения общности их свойств. В частности, используются следующие объекты теории множеств:

- 1) кортеж – конечная упорядоченная последовательность элементов, где каждый элемент принадлежит некоторому соответствующему множеству;
- 2) вектор – частный случай кортежа, в котором все элементы принадлежат одному и тому же множеству [18].

Результаты и обсуждение

Поскольку ИКК может включать произвольное число признаков, предлагается представить информацию о значимых признаках в виде вектора элементов. Следовательно, кардинальное число этого вектора будет равно числу таких признаков. Признаки могут состоять из одного или нескольких значений одного типа, поэтому каждый элемент вектора представляется вложенным вектором значений отдельного признака.

Ввиду того, что одних значений недостаточно для проведения классификации, каждый элемент вектора должен содержать информацию и о типе признака. Так как состав признаков может меняться, то для гарантированного различения классификатором значений разных признаков каждый элемент вектора должен иметь некоторый идентификатор признака. Также идентификатор признака позволит получать служебную информацию о признаке, необходимую для генерации ГХК (например, диапазон допустимых значений или путь к файлам библиотеки графических примитивов). Поскольку в ИКК должны учитываться и цели классификации, элементы вектора должны содержать информацию о степени значимости признака для классификации. Следовательно, каждый элемент вектора признаков должен представлять собой четырехэлементный кортеж: *<Идентификатор признака, Тип признака, Степень значимости, Вложенный вектор значений>*.

В качестве множества значений идентификатора признака выбрано множество значений guid (128-битные номера, используемые для уникальной идентификации ресурсов) [19]. Для удобства дальнейшего растрово-графического представления ИКК в 256-тоновой градации в качестве множества значений степеней значимости выбран целочисленный отрезок {0, ..., 255}. Элементы в векторе значений представлены объектами произвольной природы, множество допустимых значений которых зависит от типа признака.

Так как для преобразования информации о признаке в графический формат должен существовать и быть реализован соответствующий алгоритм, множество поддерживаемых типов ограничено и конечно. Базовыми элементами этого множества являются: численный тип, категориальный тип, текстовый тип.

Таким образом, теоретико-множественный вид информации о значимых признаках объекта, подлежащего классификации, можно представить следующими выражениями:

$$I = \text{Guid} , \quad (1)$$

$$T = \{\text{Numerical}, \text{Categorical}, \text{Text}, \dots\} , \quad (2)$$

$$S = [0, 255], \quad (3)$$

$$V = (R_1 \dots R_n), n \in N, \quad (4)$$

$$Info = (E_1 \dots E_n), n \in N, E \in I \times T \times S \times V, \quad (5)$$

где I – множество идентификаторов; $Guid$ – множество значений глобальных идентификаторов; T – множество поддерживаемых типов; S – множество значений степеней значимостей; V – множество значений признака; R – множество действительных чисел; N – множество натуральных чисел; E – признак объекта (4-элементный кортеж); $Info$ – совокупная информация о признаках объекта.

Следующий шаг – свертка выражения (5) в единое универсальное представление ИКК (в растровое графическое представление). При этом механизм свертки должен зависеть от типа признака и учитывать семантику признака, его положение в векторе и важность его для классификации. Следовательно, реализация свертки подразумевает, что для каждого типа признаков нужно иметь отдельный алгоритм преобразования значения в графическое представление. Некоторые из таких алгоритмов уже описаны авторами в работе [20].

Таким образом, ГХК будет формироваться путем последовательного применения алгоритмов графического преобразования векторов признаков в соответствии с их типом. На этапе построения ГХК целесообразно использовать векторную графику и лишь на завершающем этапе выполнять преобразование в растровый формат.

На вход каждый из алгоритмов должен принимать элемент вектора с информацией о признаке. Возвращаемое значение должно содержать отображение информации о признаке на графическую форму. Из соображений универсальности отображение выполняется с помощью одного или нескольких графических примитивов для каждого значения с информацией об их относительной позиции и масштабе. Таким образом, на выходе каждого из алгоритмов будет получен вектор трехэлементных кортежей следующего вида: *<Графический примитив (в векторном формате), Относительная позиция примитива, Масштаб примитива>*.

При этом степень значимости признака будет передаваться через прозрачность примитивов, соответствующих значениям признака.

Алгоритм формирования графического представления ИКК создает пустое полотно черного цвета определенных размеров. Затем он последовательно наносит на полотно примитивы из трехэлементных кортежей с учетом указанных относительных позиций и масштабов. При этом опорная позиция на полотне для нанесения примитивов определенного признака определяется его положением в векторе с информацией о признаках. После нанесения всех графических примитивов на полотно оно преобразуется в растровый формат. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

Таким образом, результатом работы алгоритма является графо-хроматическая карта, представляющая собой универсальное графическое представление ИКК.

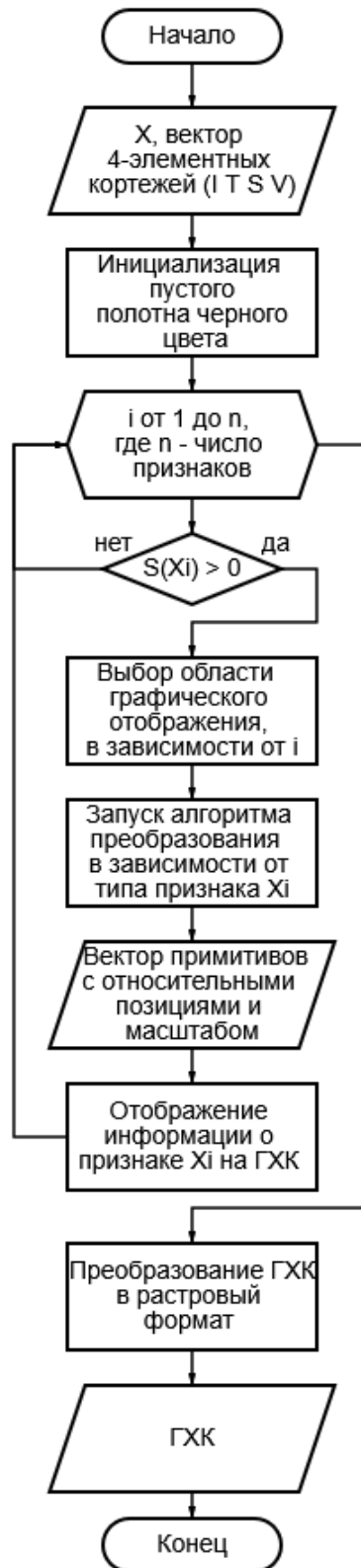


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования ГХК

Математическое представление ИКК выражается формальными выражениями:

$$R = (Primitive, Pos, Scale), \quad Pos \in N^2, \quad Scale \in R, \quad (6)$$

$$Result = (R_1 \dots R_n), n \in N, \quad (7)$$

$$S(Info_n) \rightarrow Result, n \in N, \quad (8)$$

$$SpecAlg = \{S_1 \dots S_t\}, t \in T, \quad (9)$$

$$TotalAlg(Info, SpecAlg) \rightarrow GraphicalICC, \quad (10)$$

где *Primitive* – некоторый графический примитив; *Pos* и *Scale* – относительная позиция и масштаб этого примитива; *S* – алгоритм, преобразующий информацию о признаке определенного типа в графическое представление; *Info* – вектор с информацией о признаках; *SpecAlg* – множество алгоритмов преобразований признаков разных типов; *T* – множество поддерживаемых типов признаков; *GraphicalICC* – графо-хроматическая карта; *TotalAlg* – алгоритм формирования графического представления ИКК (графо-хроматической карты) [20].

В дальнейшем для проверки качества классификации с использованием ИКК планируется реализовать прототип системы классификации на языке C# в среде Visual Studio 2022. Сведения об объектах будут проходить через несколько этапов: этап предобработки данных, этап формирования растрового представления ГХК, этап классификации полученных ГХК. Для проведения классификации система будет загружать заранее обученные на наборах ГХК модели.

Использование модели графического представления ИКК для классификации позволит свести гетерогенные признаки объекта разного типа и состава в единый формат, что избавит от необходимости различных предварительных преобразований. При этом не требуется менять структуру классификатора при изменении числа признаков или при появлении признака другого типа – в любом случае классификатор принимает на вход изображение определенного размера. Предлагаемый подход позволит более гибко учитывать значимость каждого признака, а также использовать простые сверточные нейронные сети в качестве классификаторов.

Заключение

Предложены концепция и формализованное теоретико-множественное представление интегрального критерия классификации, позволяющего алгоритмизировать выбор точек зрения на исследуемую предметную область. На основе критериев классификации определяется состав значимых признаков объекта. Для его унифицированного представления предлагается использовать единый формат в виде растрового графического изображения – графо-хроматической карты.

Разработан алгоритм формирования графо-хроматических карт, на вход которого подается вектор 4-элементных кортежей (формальное представление ИКК), на выходе формируется вектор 3-элементных кортежей (формальное представление ГХК) с последующим его преобразованием в растровую графическую форму. Далее полученные ГХК объектов могут быть переданы на вход

сверточной нейронной сети для выполнения процедуры классификации, стандартным для растровых изображений образом. При этом ГХК устойчивы к пропускам в данных, что уменьшает требования к их предобработке.

Предложенное формальное представление ИКК универсально и позволяет уменьшить зависимость классификатора от количества признаков, их типа и от точки зрения на классификацию в целом. Это существенно упрощает процедуру распределения гетерогенных объектов по классам за счет ее приведения к хорошо изученной задаче классификации растровых графических изображений.

Таким образом, достигается основная цель исследования – сложная и трудноформализуемая задача классификации сводится к единому автоматизированному процессу – хорошо управляемому, наглядному, поддающемуся машинному обучению и инвариантному к специфике предметной области.

Список литературы

1. Berisha B., Mëziu E. Big Data Analytics in Cloud Computing: An overview // *Journal of cloud computing*. 2022. № 11 (24). doi: 10.1186/s13677-022-00301-w
2. Lim J. What is data classification? // *Alation*. URL: <https://www.alation.com/blog/what-is-data-classification/> (дата обращения: 12.04.2024).
3. Yang Y., Wu Y.F., Zhan D.Ch., Liu Zh.B., Jiang Y. Complex object classification: A multi-modal multi-instance multi-label deep network with optimal transport // *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2018. P. 2594–2603.
4. Краснянский М. Н., Обухов А. Д., Воякина А. А., Соломатина Е. М. Сравнительный анализ методов машинного обучения для решения задачи классификации документов научно-образовательного учреждения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2018. № 3. С. 173–182. doi: 10.17308/sait.2018.3/1245
5. Коршунов А., Белобородов И., Гомзин А., Чуприна К., Астраханцев Н., Недумов Я., Турдаков Д. Определение демографических атрибутов пользователей микроблогов // *Труды Института системного программирования РАН*. 2013. С. 179–194.
6. Куликова А. А. Подход к классификации пользователей в социальных сетях // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 2. С. 14–18.
7. Станкевич М. А., Игнатьев Н. А., Смирнов И. В., Кисельникова Н. В. Выявление личностных черт у пользователей социальной сети ВКонтакте // *Вопросы кибербезопасности*. 2019. № 4. С. 80–87. doi: 10.21681/2311-3456-2019-4-80-87
8. Жиряева Е. В., Наумов В. Н. Метод анализа текстов при тарифной классификации товаров в таможенном деле // *Программные продукты и системы*. 2020. № 3. С. 538–548.
9. Сетлак Г. Использование искусственных нейронных сетей для решения задач классификации в менеджменте // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2004. № 1. С. 127–135.
10. Nima M., Histon J., Dizaji R., Waslander S. L. Feature extraction and radar track classification for detecting UAVs in civilian airspace // *2014 IEEE Radar Conference*. Cincinnati, OH, USA, 2014. С. 0674–0679. doi: 10.1109/RADAR.2014.6875676
11. Сенцов А. А., Поляков В. Б., Иванов С. А., Помозова Т. Г. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов // *Труды МАИ*. 2023. № 21.
12. Бождай А. С., Горшенин Л. Н. Метод классификации объектов с гетерогенным набором информационных признаков, основанный на генерации графохроматических карт // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2024. № 3 (71). С. 5–13. doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-1 EDN: BGBNIC

13. Stepp R., Michalsky R. S. Conceptual clustering of structured objects: a goal-oriented approach // *AI Journal*. 1986. P. 103–110.
14. Selić B., Pierantonio A. Fixing Classification: A Viewpoint-Based Approach // *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. ISoLA 2021. Lecture Notes in Computer Science*. 2021. P. 346–356. doi: 10.1007/978-3-030-89159-6_22
15. Tang J., Alelyani S., Liu H. Feature Selection for Classification: A Review // *Data Classification: Algorithms and Applications*. 2014. doi: 10.1201/b17320-3
16. Dash M., Liu H. Feature Selection for Classification // *Intelligent Data Analysis*. 1997. P. 131–156.
17. Rawat W., Wang Z. Deep convolutional neural networks for image classification: A comprehensive review // *Neural Computation*. 2017. № 29. P. 2352–2449.
18. Кorteжи и декартово произведение множеств // Региональный финансово-экономический институт. URL: <https://it.rfei.ru/course/~mBme/~6v6/~0pCLCk> (дата обращения: 20.05.2025).
19. Guid // Microsoft. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.guid?view=net-8.0> (дата обращения: 10.05.2025).
20. Бождай А. С., Горшенин Л. Н. Разработка алгоритма генерации графо-хроматических карт для решения задач классификации // *Вестник Пензенского государственного университета*. 2024. № 4. P. 22–26. EDN: LOCJGQ

References

1. Berisha B., Mëziu E. Big Data Analytics in Cloud Computing: An overview. *Journal of cloud computing*. 2022;11(24). doi: 10.1186/s13677-022-00301-w
2. Lim J. What is data classification? *Alation*. Available at: <https://www.alation.com/blog/what-is-data-classification/> (accessed 12.04.2024).
3. Yang Y., Wu Y.F., Zhan D.Ch., Liu Zh.B., Jiang Y. Complex object classification: A multi-modal multi-instance multi-label deep network with optimal transport. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2018:2594–2603.
4. Krasnyanskiy M.N., Obukhov A.D., Voyakina A.A., Solomatina E.M. A comparative analysis of machine learning methods for solving the problem of document classification in a scientific and educational institution. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technology*. 2018;(3):173–182. (In Russ.). doi: 10.17308/sait.2018.3/1245
5. Korshunov A., Beloborodov I., Gomzin A., Chuprina K., Astrakhantsev N., Nedumov Ya., Turdakov D. Determining demographic attributes of microblogging users. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2013:179–194. (In Russ.)
6. Kulikova A.A. An approach to classifying users in social networks. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy = East European Journal of Advanced Technologies*. 2011;(2):14–18. (In Russ.)
7. Stankevich M.A., Ignat'ev N.A., Smirnov I.V., Kisel'nikova N.V. Identifying personality traits in VKontakte users. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2019;(4):80–87. (In Russ.). doi: 10.21681/2311-3456-2019-4-80-87
8. Zhiryaeva E.V., Naumov V.N. Method of text analysis in tariff classification of goods in customs matters. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2020;(3):538–548. (In Russ.)
9. Setlak G. Using artificial neural networks to solve classification problems in management. *Radioelektronika, informatika, upravlinnya = Radio electronics, computer science, management*. 2004;(1):127–135. (In Russ.)
10. Nima M., Histon J., Dizaji R., Waslander S.L. Feature extraction and radar track classification for detecting UAVs in civilian airspace. *2014 IEEE Radar Conference*. 2014:0674–0679. doi: 10.1109/RADAR.2014.6875676

11. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Ivanov S.A., Pomozova T.G. Method of intercepting small-sized and stealthy unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2023;(21). (In Russ.)
12. Bozhday A.S., Gorshenin L.N. A method for classifying objects with a heterogeneous set of information features based on the generation of graphochromatic maps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-3-1 EDN: BGBNIC
13. Stepp R., Michalsky R.S. Conceptual clustering of structured objects: a goal-oriented approach. *AI Journal*. 1986;103–110.
14. Selić B., Pierantonio A. Fixing Classification: A Viewpoint-Based Approach. *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. ISoLA 2021. Lecture Notes in Computer Science*. 2021:346–356. (In Russ.). doi: 10.1007/978-3-030-89159-6_22
15. Tang J., Alelyani S., Liu H. Feature Selection for Classification: A Review. *Data Classification: Algorithms and Applications*. 2014. doi: 10.1201/b17320-3
16. Dash M., Liu H. Feature Selection for Classification. *Intelligent Data Analysis*. 1997:131–156.
17. Rawat W., Wang Z. Deep convolutional neural networks for image classification: A comprehensive review. *Neural Computation*. 2017;(29):2352–2449.
18. Tuples and the cartesian product of sets. *Regional'nyy finansovo-ekonomicheskii institut = Regional Financial and Economic Institute*. (In Russ.). Available at: <https://it.rfei.ru/course/~mBme/~6v6/~0pCLCk> (accessed 20.05.2025).
19. Guid. *Microsoft*. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.guid?view=net-8.0> (accessed 10.05.2025).
20. Bozhday A.S., Gorshenin L.N. Development of an algorithm for generating graphic-chromatic maps for solving classification problems. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2024;(4):22–26. (In Russ.). EDN: LOCGJQ

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Сергеевич Бождай

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: bozhday@yandex.ru

Aleksandr S. Bozhday

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of computer
aided design systems, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Лев Николаевич Горшенин

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: gorshenin.lev@gmail.com

Lev N. Gorshenin

Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.06.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.07.2025

Принята к публикации / Accepted 05.09.2025

УДК 330.4

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-2

Оценивание параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска

С. И. Носков¹, С. В. Беляев², А. Р. Чекалова³^{1,2,3}Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия¹sergey.noskov.57@mail.ru, ²bsv2001@list.ru, ³chekalova49@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Кластерные регрессионные модели весьма эффективны при исследовании различных аспектов функционирования анализируемых объектов, в том числе связанных с риском. В частности, рассмотрены проблемы анализа: странового риска, риска программного проекта, риска отказов для городской трубопроводной сети, риска загрязнения грунтовых вод, пожарного риска зданий, риска наводнений, риска дефолта в кредитовании. Цель – разработка алгоритмического способа идентификации параметров кластерной кусочно-линейной функции риска. *Материалы и методы.* Используются статистические данные за 2023 г. по 10 субъектам Сибирского федерального округа. Применен алгоритмический способ, основанный на сведениях задачи оценивания параметров кластерной кусочно-линейной функции риска к задаче линейно-булева программирования. Функция потерь задана в виде суммы модулей ошибок аппроксимации. *Результаты.* Построена кластерная кусочно-линейная функция риска для цен на жилье в субъектах Сибирского федерального округа. В качестве независимых переменных задействованы цены на кирпич, цемент и обрезную доску. Модель обладает высоким качеством аппроксимации – средняя процентная ошибка составляет 0,4. *Выводы.* Задача оценивания неизвестных параметров кластерной кусочно-линейной функции риска при задании функции потерь в виде суммы модулей ошибок аппроксимации сведена к задаче линейно-булева программирования.

Ключевые слова: кластерная кусочно-линейная функция риска, оценивание параметров, задача линейно-булева программирования, индексное множество, цены на жилье

Для цитирования: Носков С. И., Беляев С. В., Чекалова А. Р. Оценивание параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 17–25. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-2

Estimation of parameters for a cluster-based piecewise linear risk regression function

S.I. Noskov¹, S.V. Belyaev², A.R. Chekalova³^{1,2,3}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia¹sergey.noskov.57@mail.ru, ²bsv2001@list.ru, ³chekalova49@gmail.com

Abstract. *Background.* The article notes that cluster regression models are highly effective in studying various aspects of the analyzed objects' functioning, including those related to risk. In particular, the following risk analysis problems are considered: country risk, software project risk, failure risk in urban pipeline networks, groundwater contamination risk, building fire risk, flood risk, and loan default risk. The objective of this work is to develop an algorithmic method for identifying the parameters of a cluster-based piecewise linear

risk function. *Results.* A cluster-based piecewise linear risk function has been constructed for housing prices in the regions of the Siberian Federal District. Independent variables include the prices of bricks, cement, and edged boards. The model demonstrates high approximation accuracy, with an average percentage error of 0.4. *Conclusions.* The problem of estimating unknown parameters of a cluster-based piecewise linear risk function, with the loss function defined as the sum of absolute approximation errors, has been reduced to a linear Boolean programming problem.

Keywords: cluster-based piecewise linear risk function, parameter estimation, linear Boolean programming problem, index set, housing prices

For citation: Noskov S.I., Belyaev S.V., Chekalova A.R. Estimation of parameters for a cluster-based piecewise linear risk regression function. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(3):17–25. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-2

Введение

Кластерные регрессионные модели эффективны при исследовании аспектов функционирования анализируемых объектов, связанных с риском. Так, в работе [1] рассматривается применение гибридных нейронных сетей, в частности иерархического кластерного анализа, для анализа странового риска, что может быть весьма интересно для политиков и других лиц, занимающихся разработкой систем раннего оповещения. В статье [2] кластерный анализ применяется для оценки риска программного проекта. Изучение измерений риска на всех уровнях показало, что даже проекты с низким риском реализации могут иметь высокий уровень риска сложности. Было изучено влияние объема проекта, методов поиска и стратегической ориентации на совокупный риск проекта. В публикации [3] предлагается метод, основанный на кластеризации и статистическом тесте, для оценки состояния риска отказов для городской трубопроводной сети с помощью небольшого объема статистической информации. Результаты показывают, что кластер трубопроводов с самым высоким риском имеет в 7 раз более высокий уровень аварийности, чем кластер с самым низким риском. Данный метод может помочь в принятии решений относительно плановых проверок и восстановления трубопроводных сетей. Исследование [4] посвящено разработке статистической кластерной модели риска, которая классифицирует безопасные и небезопасные районы в отношении геогенного загрязнения мышьяком грунтовых вод в Китае. В работе [5] представлена модель анализа пожарного риска здания на основе сценарных кластеров и ее применение в управлении. С помощью подобных моделей можно принимать меры по управлению пожарным риском для улучшения оценки пожарной безопасности зданий, снижения уровней пожарного риска и причиненного ущерба.

В публикации [6] проведено исследование бизнес-моделей 1237 банков в период с 2011 по 2017 г. с применением кластерного анализа на основе отчетов о прибылях и убытках. Выявлено, что эффективная банковская бизнес-модель должна быть основана на различных эндогенных факторах (статьи финансовой отчетности банка и операционная стратегия) и может быть связана с экзогенными факторами (финансовые кризисы, политика центральных банков и т.д.). В работе [7] изучается динамическая модель оценки риска наводнений, построенная на принципе кластеризации и индексах риска исходя из всей структуры системы. Применяется подход нечеткой аналитической

иерархии для определения весов индексов, а будущее значение каждого индекса моделируется с помощью улучшенного алгоритма нейронной сети обратного распространения. В статье [8] предлагается интегрированная методология оценки риска наводнений, основанная на использовании улучшенного метода энтропийного веса и кластерного алгоритма k-средних. Для проверки применимости предлагаемого подхода выбран регион Хайкоу в Китае. Метод обучения на основе адаптивной кластеризации с использованием ансамбля с несколькими представлениями, образованными градиентными деревьями решений, для прогнозирования риска дефолта в кредитовании рассматривается в [9]. В исследовании [10] разрабатывается комплексная причинно-следственная модель морских инцидентов с использованием методов кластерного анализа и причинно-следственной связи для выявления и классификации основных факторов, способствующих морским авариям. Этот подход позволяет систематически изучать взаимозависимости между различными факторами, обеспечивая целостное понимание причин инцидентов. В статье [11] применяются неконтролируемые алгоритмы кластеризации машинного обучения для поиска групп инвесторов, которые ведут себя схожим образом. Показано, что информация о поле, регионе проживания и семейном положении не объясняет поведение клиентов, тогда как восемь переменных частоты обращений, объема торговли и транзакций являются наиболее информативными.

Цель исследования – разработка алгоритмического способа идентификации параметров кластерной кусочно-линейной функции риска, основанного на сведении этой задачи к задаче линейно-булева программирования.

Сведение задачи идентификации параметров кластерной кусочно-линейной функции риска к задаче линейно-булева программирования

При анализе сложных социально-экономических и технических систем весьма эффективным бывает применение кусочно-линейной регрессионной функции риска [12, 13]:

$$y_k = \max \{ \alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km} \} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

здесь y – зависимая переменная; $x_i, i = \overline{1, m}$ – независимые переменные; k – номер наблюдения; n – число наблюдений; $\alpha_i, i = \overline{1, m}$ – оцениваемые параметры; $\varepsilon_k, k = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации. Все переменные в модели (1) детерминированы.

Функция риска была разработана для анализа взаимовлияния негативных факторов (рисков) функционирования различных технических и экономических объектов. Отличительным свойством функции риска является то, что, как следует из модели (1), значение выходной переменной в каждом наблюдении равно максимальному значению независимой переменной с некоторым коэффициентом, и никакое снижение значений остальных переменных не приведет к его уменьшению.

В работе [14] введена кластерная кусочно-линейная регрессионная функция риска вида

$$y_k = \alpha_0^j + \max \{ \alpha_1^j x_{k1}, \alpha_2^j x_{k2}, \dots, \alpha_m^j x_{km} \} + \varepsilon_k^j, \quad j = \overline{1, r}, \quad k \in P^j, \quad (2)$$

здесь r – заранее заданное число кластеров; $\alpha_i^j, j = \overline{1, r}, i = \overline{0, m}$ – подлежащие определению оценки параметров, индексные множества $P^j \subset \{1, 2, \dots, n\}$, $j = \overline{1, r}$ фиксируют номера входящих в соответствующие кластеры наблюдений; $\varepsilon_k^j, j = \overline{1, r}, k = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации.

Составы индексных множеств $P^j, j = \overline{1, r}$, как и оценки параметров $\alpha_i^j, j = \overline{1, r}, i = \overline{0, m}$, также следует вычислить. Эти множества не должны пересекаться, а их объединение – совпадать с множеством номеров наблюдений исходной выборки данных:

$$\bigcup_{j=1}^r P^j = \{1, 2, \dots, n\}, P^i \cap P^j = \emptyset, i \neq j.$$

Введем обозначения [14]:

$$A = \|\alpha_i^j\|, j = \overline{1, r}, i = \overline{0, m}, \Xi = \|\sigma_{kj}\|, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r},$$

где

$$\sigma_{kj} = \begin{cases} 1, & k \in P^j, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда, если в качестве расстояния между вычисленными по кусочно-линейной модели (2) и заданными в выборке значениями выходной переменной принято городское расстояние, вычисление оценок параметров и составов индексных множеств $P^j, j = \overline{1, r}$, уравнения (2) осуществляется посредством решения следующей задачи оптимизации:

$$G(A, \Xi) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r \sigma_{kj} |\varepsilon_k^j| \rightarrow \min. \quad (3)$$

Решение задачи (3) будем искать с применением вычислительных приемов, использованных в работах [15, 16].

Введем обозначения:

$$s_{kij} = \begin{cases} 1, & a_i^j x_{ki} = \max_{s=\overline{1, m}} \{a_s^j x_{ks}\}, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad v_{kj} = \max_{i=\overline{1, m}} \{a_i^j x_{ki}\}, \quad k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r}.$$

Тогда задача минимизации функции (3) может быть сведена к следующей задаче линейно-булева программирования (ЛБП):

$$v_{kj} \geq a_i^j x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r}, i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$a_i^j x_{ki} - v_{kj} \geq (s_{kij} - 1)M_i, \quad k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r}, i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m s_{kij} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (6)$$

$$\alpha_0^j + v_{kj} - \bar{M} \sigma_{kj} + u_k \geq y_k - \bar{M}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\alpha_0^j + v_{kj} + \bar{M} \sigma_{kj} - u_k \leq y_k + \bar{M}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^r \sigma_{kj} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$s_{kij} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (10)$$

$$\sigma_{kj} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$u_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$v_{kj} \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n u_k - \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^m \delta_{ij} a_i^j \rightarrow \min. \quad (14)$$

Здесь δ_{ij} , $j = \overline{1, r}$, $i = \overline{1, m}$ – заданные малые числа; $\bar{M}$ и $M_i, i = \overline{1, m}$ – большие положительные числа.

Обратим внимание на одно важное обстоятельство – перед решением задачи ЛБП (4)–(14) исходные данные полезно пронормировать с помощью использования одного из многочисленных приемов для существенного сокращения времени счета и недопущения возможного заикливания. Для численного решения этой задачи на реальных данных могут быть задействованы соответствующие эффективные программные средства (см., в частности, [17–20]).

Построение кластерной кусочно-линейной функции риска для цен на жилье в субъектах Сибирского федерального округа

Применим описанный выше алгоритмический способ для построения кластерной кусочно-линейной функции риска для цен на жилье в территориальных образованиях Сибирского федерального округа (СФО). Введем следующие обозначения: y – средние цены на первичном рынке жилья, руб./м²; x_1 – цена на кирпич красный, руб./1000 шт.; x_2 – цена на цемент тарированный, руб./50 кг; x_3 – цена на доску обрезную, руб./м³.

В качестве информационной базы моделирования используем статистическую информацию за 2023 г. [21, 22] (табл. 1).

Таким образом, $n = 10$, $m = 3$. Примем $r = 2$. В результате решения задачи ЛБП (4)–(14) получим модель:

$$y_k = -446917 + \max\{23,9x_{k1}; 945,3x_{k2}; 28,4x_{k3}\} + \epsilon_k^1, \quad k = \overline{1, 10}, \quad (15)$$

$$P^1 = \{1, 3, 8, 9\},$$

$$y_k = 25965 + \max\{3, 3x_{k1}; 136, 8x_{k2}; 4, 28x_{k3}\} + \varepsilon_k^2, \quad k = \overline{1, 10}, \quad (16)$$

$$P^2 = \{2, 4, 5, 6, 7, 10\}, \quad G = 4140, \quad E = 0,4 \, \%.$$

Здесь E – средняя процентная ошибка.

Таблица 1

Исходная информация

Субъект	y	x_1	x_2	x_3
1. Республика Алтай	133287	23427,05	509,72	20463,92
2. Республика Тыва	117904	22594,65	672,06	17368,82
3. Республика Хакасия	92936	16719,11	571,06	16067,83
4. Алтайский край	106555	17417,82	501,45	18817,07
5. Красноярский край	115189	25313,24	682,04	20050,65
6. Иркутская область	112677	26058,72	631,83	16710,5
7. Кемеровская область	103206	20911,98	564,62	15599,33
8. Новосибирская область	120304	16907,27	600,01	16306,09
9. Омская область	105812	23105,13	508,07	13783,64
10. Томская область	113830	20474,51	641,84	15365,89

Анализ частных регрессий (15) и (16) указывает на значительное расхождение значений оценок их параметров, что может свидетельствовать о существенном несовпадении тенденций в характере влияния независимых переменных на выходной фактор, разумеется, в классе кластерных кусочно-линейных функций риска. При этом в первый кластер (соответствующий индексному множеству P^1) вошли Республики Алтай и Хакасия, Новосибирская и Омская области, а во второй (соответствующий P^2) – Республика Тыва, Алтайский и Красноярский края, Иркутская, Кемеровская и Томская области.

Кластерная кусочно-линейная функция риска (15), (16) может быть успешно применена для решения различных аналитических задач.

Заключение

Разработан алгоритмический способ оценивания неизвестных параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска. При этом, если в качестве расстояния между расчетными и реальными значениями зависимой переменной модели определено городское расстояние, данный способ сводится к задаче линейно-булева программирования. Построена кластерная кусочно-линейная функция риска для цен на жилье в субъектах Сибирского федерального округа.

Список литературы

1. Yim J., Mitchell H. Comparison of country risk models: hybrid neural networks, logit models, discriminant analysis and cluster techniques // Expert Systems with Applications. 2005. Vol. 28, № 1. P. 137–148.
2. Wallace L., Keil M., Rai A. Understanding software project risk: a cluster analysis // Information & Management. 2004. Vol. 42, № 1. P. 115–125.

3. Wang Z., Li S. Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster model // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 196. Art. 106781.
4. Li Y., Wang D., Liu Y., Zheng Q., Sun G. A predictive risk model of groundwater arsenic contamination in China applied to the Huai River Basin, with a focus on the region's cluster of elevated cancer mortalities // *Applied Geochemistry*. 2017. Vol. 77. P. 178–183.
5. Xin J., Huang C. Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management // *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 62, Part A. P. 72–78.
6. Lagasio V., Quaranta A. G. Cluster analysis of bank business models: The connection with performance, efficiency and risk // *Finance Research Letters*. 2022. Vol. 47, Part A. Art. 102640.
7. Zhao J., Jin J., Guo Q., Liu L., Chen Y., Pan M. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2014. Vol. 28. P. 2175–2183.
8. Xu H., Ma C., Lian J., Xu K., Chaima E. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 563. P. 975–986.
9. Song Y., Wang Y., Ye X., Wang D., Yin Y., Wang Y. Multi-view ensemble learning based on distance-to-model and adaptive clustering for imbalanced credit risk assessment in P2P lending // *Information Sciences*. 2020. Vol. 525. P. 182–204.
10. Melnyk O., Petrov I., Melenchuk T., Zaporozhets A., Bugaeva S., Rossomakha O. Maritime Systems, Transport and Logistics // *Proceedings of the International Conference*. Springer, 2025. P. 89–105.
11. Thompson J. R. J., Feng L., Reesor R. M., Grace C. Know Your Clients' Behaviours: A Cluster Analysis of Financial Transactions // *Journal of Risk and Financial Management*. 2021. Vol. 14, № 2. Art. 50.
12. Носков С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. 2017. Т. 1. С. 417–421.
13. Носков С. И., Хоняков А. А. Применение функции риска для моделирования экономических систем // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020. № 5 (33). С. 85–92.
14. Носков С. И. Некоторые формы кластерных кусочно-линейных регрессий // *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*. 2024. № 4 (24). С. 41–44.
15. Носков С. И. Идентификация параметров комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели // *Вестник Югорского государственного университета*. 2022. № 4 (67). С. 115–119.
16. Носков С. И., Беляев С. В. Оценка непротиворечивости кластерной линейной регрессионной модели // *Вестник Технологического университета*. 2025. Т. 28, № 2. С. 88–91.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612409. Программа решения задач целочисленного линейного программирования с булевыми переменными / Д. О. Есиков, А. Н. Ивутин, Е. В. Ларкин, А. С. Новиков ; заявитель ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет». № 2014664144 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 18.02.2015.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613846. Программа решения задачи целочисленного линейного программирования / Н. А. Егоров ; заявитель АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей». № 2024612585 ; заявл. 09.02.2024 ; опубл. 16.02.2024.
19. Шипицына Р. Е., Витвицкий Е. Е. Сравнение удобства использования программных продуктов при решении транспортной задачи линейного программирования: LPsolve IDE и Microsoft Excel // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сб. тр. V Нац. науч.-практ. конф.* Омск, 2022. С. 250–254.
20. Волошинов В. В., Смирнов С. А. Оценка производительности крупноблочного алгоритма метода ветвей и границ в вычислительной среде EVEREST // *Программные системы: теория и приложения*. 2017. Т. 8, № 1 (32). С. 105–119.

21. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 03.04.2025).
22. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 03.04.2025).

References

1. Yim J., Mitchell H. Comparison of country risk models: hybrid neural networks, logit models, discriminant analysis and cluster techniques. *Expert Systems with Applications*. 2005;28(1):137–148.
2. Wallace L., Keil M., Rai A. Understanding software project risk: a cluster analysis. *Information & Management*. 2004;42(1):115–125.
3. Wang Z., Li S. Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;196:106781.
4. Li Y., Wang D., Liu Y., Zheng Q., Sun G. A predictive risk model of groundwater arsenic contamination in China applied to the Huai River Basin, with a focus on the region's cluster of elevated cancer mortalities. *Applied Geochemistry*. 2017;77:178–183.
5. Xin J., Huang C. Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management. *Fire Safety Journal*. 2013;62(A):72–78.
6. Lagasio V., Quaranta A.G. Cluster analysis of bank business models: The connection with performance, efficiency and risk. *Finance Research Letters*. 2022;47(A):102640.
7. Zhao J., Jin J., Guo Q., Liu L., Chen Y., Pan M. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2014;28:2175–2183.
8. Xu H., Ma C., Lian J., Xu K., Chaima E. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China. *Journal of Hydrology*. 2018;563:975–986.
9. Song Y., Wang Y., Ye X., Wang D., Yin Y., Wang Y. Multi-view ensemble learning based on distance-to-model and adaptive clustering for imbalanced credit risk assessment in P2P lending. *Information Sciences*. 2020;525:182–204.
10. Melnyk O., Petrov I., Melenchuk T., Zaporozhets A., Bugaeva S., Rossomakha O. Maritime Systems, Transport and Logistics. *Proceedings of the International Conference*. Springer, 2025:89–105.
11. Thompson J.R.J., Feng L., Reesor R.M., Grace C. Know Your Clients' Behaviours: A Cluster Analysis of Financial Transactions. *Journal of Risk and Financial Management*. 2021;14(2):50.
12. Noskov S.I. Identification of parameters of a piecewise linear risk function. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona = Transport infrastructure of the Siberian region*. 2017;1:417–421. (In Russ.)
13. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Application of the risk function to modeling economic systems. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik = South Siberian Scientific Bulletin*. 2020;(5):85–92. (In Russ.)
14. Noskov S.I. Some forms of cluster piecewise linear regression. *In-formatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami = Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2024;(4):41–44. (In Russ.)
15. Noskov S.I. Identification of parameters of a combined piecewise linear regression model. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Yugra State University*. 2022;(4):115–119. (In Russ.)
16. Noskov S.I., Belyaev S.V. Evaluation of the consistency of a cluster linear regression model. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2025;28(2):88–91. (In Russ.)
17. Certificate of state registration of computer programs № 2015612409. *Programma resheniya zadach tselochislennogo lineynogo program-mirovaniya s bulevymi peremennymi = A program for solving integer linear programming problems with Bool-*

- ean variables. D.O. Esikov, A.N. Ivutin, E.V. Larkin, A.S. Novikov; applicant FGBOU VPO «Tul'skiy gosudarstvennyy universitet». № 2014664144: appl. 30.12.2014: publ. 18.02.2015. (In Russ.)
18. Certificate of state registration of computer programs № 2024613846. *Programma resheniya zadachi tselochislennogo lineynogo programmirovaniya = A program for solving integer linear programming problems*. N.A. Egorov; applicant AO «Kontsern vozdushno-kosmicheskoy oborony «Almaz – Antey». № 2024612585: appl. 09.02.2024: publ. 16.02.2024. (In Russ.)
19. Shipitsyna R.E., Vitvitskiy E.E. Comparison of the usability of software products for solving the transport linear programming problem: LPSolve IDE and Microsoft Excel. *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo: sb. tr. V Nats. nauch.-prakt. konf. = Education. Transport. Innovation. Construction: proceedings of the 5th National scientific and practical conference*. Omsk, 2022:250–254. (In Russ.)
20. Voloshinov V.V., Smirnov S.A. Performance evaluation of the coarse-grained branch-and-bound algorithm in the EVEREST computing environment. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software systems: theory and applications*. 2017;8(1):105–119. (In Russ.)
21. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki = Federal State Statistics Service*. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 03.04.2025).
22. *Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema (EMISS) = Unified Interdepartmental Information and Statistical System*. (In Russ.). Available at: <https://www.fedstat.ru/> (accessed 03.04.2025).

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Иванович Носков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационных
систем и защиты информации,
Иркутский государственный университет
путей сообщения (Россия, г. Иркутск,
ул. Чернышевского, 15)

E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru

Sergey I. Noskov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of information systems and information
security, Irkutsk State Transport
University (15 Chernyshevskogo street,
Irkutsk, Russia)

Сергей Вячеславович Беляев

магистрант, Иркутский государственный
университет путей сообщения (Россия,
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

E-mail: bsv2001@list.ru

Sergey V. Belyaev

Master's degree student, Irkutsk State
Transport University (15 Chernyshevskogo
street, Irkutsk, Russia)

Александра Романовна Чекалова

магистрант, Иркутский государственный
университет путей сообщения (Россия,
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

E-mail: chekalova49@gmail.com

Aleksandra R. Chekalova

Master's degree student, Irkutsk State
Transport University (15 Chernyshevskogo
street, Irkutsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 22.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.06.2025

Принята к публикации / Accepted 28.08.2025

УДК 004.9:681.3

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-3

Формализация и реализация логико-вероятностных и логико-алгебраических операционных моделей функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем

Г. В. Петушков¹, А. С. Сигов²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹petushkov@mirea.ru, ²sigov@mirea.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На основе проведенного исследования разработок в области функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем показана актуальность выполнения работ в данном направлении, что обусловлено увеличением спроса на доступные высокопроизводительные вычисления, растущим внедрением методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Цель – разработка и экспериментальная апробация на уровне имитационных моделей методики и технологии реализации функциональной архитектуры вычислительных систем кластерного типа на основе высокоскоростных коммутаторов. *Материалы и методы.* Использован логико-вероятностный подход к созданию моделей определяемой приложениями и программным обеспечением промежуточного уровня *middleware* функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем, позволяющий ускорить создание имитационных моделей для ряда важных режимов использования кластера и осуществить переход к логико-алгебраическим формализованным спецификациям на программные приложения. *Результаты.* Построены имитационные логико-вероятностные и логико-алгебраические модели для ряда важных вариантов использования вычислительного кластера, проведены необходимые статистические эксперименты с данными моделями, давшие обоснования к реализациям соответствующему моделям программному обеспечению промежуточного уровня *middleware*. *Выводы.* Предложена методология разработки функциональной архитектуры вычислительной системы кластерного типа, определяемой спецификациями в форме логико-вероятностных и родственных им логико-алгебраических моделей, что может ускорить подготовку кластера к эксплуатации в организации.

Ключевые слова: вычислительная система кластерного типа, приложение промежуточного уровня, функциональная архитектура, логико-вероятностная модель, логико-алгебраическая модель, режимы обработки запросов, результаты моделирования

Для цитирования: Петушков Г. В., Сигов А. С. Формализация и реализация логико-вероятностных и логико-алгебраических операционных моделей функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 26–62. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-3

Formalization and implementation of logical-probabilistic and logical-algebraic operational models of the functional architecture of cluster computing systems

G.V. Petushkov¹, A.S. Sigov²

^{1,2}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹petushkov@mirea.ru, ²sigov@mirea.ru

© Петушков Г. В., Сигов А. С., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. *Background.* Based on the conducted study of developments in the field of functional architecture of cluster computing systems, the relevance of work in this direction is shown, which is due to the increasing demand for affordable high-performance computing, the growing implementation of artificial intelligence and machine learning methods. The purpose of the work is to develop and experimentally test at the level of simulation models a methodology and technology for implementing the functional architecture of cluster-type computing systems based on high-speed switches. *Materials and methods.* A logical-probabilistic approach is used to create models of the functional architecture of cluster computing systems determined by applications and middleware, which allows accelerating the creation of simulation models for a number of important modes of cluster use and making the transition to logical-algebraic formalized specifications for software applications. *Results.* Simulation logical-probabilistic and logical-algebraic models for a number of important variants of using a computing cluster were constructed, the necessary statistical experiments with these models were carried out, which provided justification for implementing the corresponding models of the middleware software. *Conclusions.* A methodology for developing the functional architecture of a cluster-type computing system, defined by specifications in the form of logical-probabilistic and related logical-algebraic models, is proposed, which can accelerate the preparation of the cluster for operation in an organization.

Keywords: cluster-type computing system, middleware-level application, functional architecture, logical-probabilistic model, logical-algebraic model, query processing modes, modeling results

For citation: Petushkov G.V., Sigov A.S. Formalization and implementation of logical-probabilistic and logical-algebraic operational models of the functional architecture of cluster computing systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(3):26–62. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-3

Введение

Кластерные вычислительные системы, как правило, отличаются архитектурной простотой, обусловленной регулярностью и однородностью, разделением аппаратуры, связью между узлами в ограниченной окрестности, топологией, не зависящей от размерности кластера, т.е. горизонтальной масштабируемостью. Реже для вычислительных кластеров характерна вертикальная или иерархическая масштабируемость. Тем не менее применение топологии, не зависящей от размерности, не препятствует созданию других виртуальных топологий, необходимых по условиям решения задач, при допустимых ограничениях производительности вследствие дополнительных виртуальных межузловых связей [1–3].

Обычно вычислительный кластер определяется как разновидность параллельной или распределенной системы, которая состоит из нескольких связанных между собой компьютеров, используемых как единый, унифицированный компьютерный ресурс [4–7].

Кластеры, предназначенные для высокопроизводительных вычислений, так называемые НРС-кластеры (НРС – High Performance Computing), позволяют выполнять большое количество однотипных вычислительных операций за короткое время. При этом вычислительный процесс распараллеливается не только между ядрами одного вычислительного узла, но и по всему набору компьютеров, которые связаны высокоскоростными каналами передачи данных. Современный уровень развития технологий позволяет организовывать

кластеры производительностью в десятки, сотни и тысячи терафлопс [8–11]. Кластерную НРС-архитектуру имеют, например, российские суперкомпьютеры «Червоненкис», «Галушкин» и «Ляпунов», используемые в дата-центрах Яндекса [12].

В решении проблемы обеспечения высокой производительности мультипроцессорных вычислительных систем большое значение имеет завершение отечественного проекта создания коммуникационной сети «Ангара», а также других коммуникационных структур, разработанных в России [13].

Известен целый ряд подобных проектов, перечисленных на сайте *parallel.ru* – сайте лаборатории параллельных информационных технологий Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ, на котором собрана информация о параллельных вычислениях, технологиях параллельного программирования, высокопроизводительных компьютерах, метакомпьютеринге, суперкомпьютерных центрах и др.

Технологии построения систем распределенных вычислений, или *grid*-систем, также можно условно отнести к кластерным технологиям. Отличие заключается в меньшей доступности вычислительных *grid*-узлов для контроля, что отрицательно сказывается на их надежности.

Вычислительным системам кластерного типа «родственны» однородные и распределенные вычислительные системы, разработанные в разное время в Академгородке Сибирского отделения Академии наук РАН. В трудах ученых исследована организация параллельных вычислений в многомодульных системах, где в качестве модулей используются элементарные машины, обладающие возможностями хранения, переработки и транспортировки данных [14, 15]. Разработана первая в мире программно-реконфигурируемая ВС «Минск-222», созданы мини-ВС МИНИМАКС и СУММА, семейство микро-ВС МИКРОС, МИКРОС-2 и МИКРОС-Т [16–18].

Отличием современных вычислительных систем кластерного типа на основе локальных сетей с коммутаторами 2-го (канального) и 3-го (межсетевого) уровней от разработанных ранее однородных вычислительных систем (ОВС) является большая гибкость архитектуры, обеспечивающая лучшие возможности реконфигурации на уровне связей между модулями, повышенная отказоустойчивость.

Многие фирмы дали оценку достоинств и преимуществ кластерной архитектуры: возможна равномерная или определяемая правилами балансировка запросов между узлами кластера; высокая отказоустойчивость за счет использования нескольких узлов и резервных каналов; масштабируемость – простое увеличение производительности кластера за счет увеличения количества узлов; возможность обслуживания и замены узлов кластера без остановки работы приложения [10, 11].

Для многих кластерных вычислительных систем в силу особенностей их построения на основе коммутаторов второго и третьего уровней характерна работа в пиринговом режиме, когда вычислительный узел может работать и в режиме клиента, и в режиме сервера, другими словами, – может работать как на прием, так и на передачу. В подобных системах узлы кластера могут обмениваться ресурсами напрямую, без посредника-сервера, либо каждый из узлов может выполнять функции сервера или управлять работой кластера. Возможен также такой пиринговый режим работы кластера, при котором

функции центрального сервера сведены лишь к контролю за потоками информации и временному размещению данных [19–22].

К числу впервые реализованных вычислительных кластеров принадлежит, например, «Беовульф» (NASA, США) – компьютерный кластер, состоящий из идентичных компьютеров потребительского класса, объединенных в небольшую локальную сеть с установленными библиотеками и программами, которые позволяют совместно использовать ресурсы [23]. В результате получается вычислительный кластер для параллельных вычислений из недорогих персональных компьютеров (ПК). Обычно используются библиотеки для параллельной обработки: интерфейс передачи сообщений (MPI) и параллельная виртуальная машина (PVM) [24].

Кластерная архитектура одной из первых также получила вычислительная система Blue Gene/L (фирма IBM) с производительностью до 1 петафлопс; это масштабируемый суперкомпьютер, который может состоять из более чем 65536 вычислительных процессоров [25].

Примером крупного кластера, используемого в астрофизических расчетах, является, например, высокопроизводительный компьютерный кластер DEGIMA, используемый в Центре передовых вычислений Университета Нагасаки (Япония) [26]. Система состоит из 144-узлов кластера ПК, соединенных через интерфейс InfiniBand. Каждый узел состоит из процессора Intel Core i7 920 с тактовой частотой 2,66 ГГц, двух видеокарт GeForce GTX295, 12 Гб памяти DDR3-1333 и Mellanox MHES14-XTC SDR InfiniBand-адаптера на материнской плате MSI X58 pro-E. Каждая видеокарта оснащена двумя графическими процессорами GT200. В целом система состоит из 144 центральных процессоров и 576 графических процессоров [26].

Технологии Infiniband и RoCE используются для высокоскоростного обмена данными в вычислительных кластерах [27, 28]. Специализированная сетевая архитектура Infiniband может достигать пропускной способности до 800 Гбит/с.

Архитектура современных кластеров строится на основе архитектурных решений в области межузловых коммуникационных сетей, позволяющих создавать сетевые инфраструктуры – как коммерчески доступные, так и высшего диапазона производительности типа Infiniband (Mellanox, США), OmniPass (Intel, США), Ангара (РФ), 6D-тор (Fujitsu, Япония), Sugon (Китай), линейки коммутаторов CRAY высшего диапазона производительности (США) и др. [29–32].

Технология создания кластеров на базе высокоскоростных коммутаторов доступна многим компаниям в разных странах; в настоящее время более 50 высокопроизводительных кластеров на коммутаторах входят в верхнюю часть списка Top 500 [33]. Многие системы распределенных вычислений могут быть отнесены к кластерам. Отличительной особенностью таких кластеров, являющихся частями больших вычислительных систем и сетей, является относительно невысокая доступность узлов-компьютеров, которые в силу разных причин подключаются и отключаются в процессе работы. В этом случае переменность конфигурации компенсируется подключением дополнительных узлов.

Естественная распределенность развертывания узлов кластера часто может быть связана с его реализацией на базе локальной или глобальной сети

с предметной ориентацией на распределенные предприятия, филиалы, офисы, производственные участки и др. В первом случае кластер может быть развернут в среде, где каждый узел должен находиться рядом с управляемым объектом или с другим источником информации. Во втором случае кластер может выполнять функции так называемого метакомпьютера, узлы которого распределены в глобальной вычислительной сети, например в Интернете. К крупномасштабным интернет-кластерам может быть отнесена *grid*-платформа BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) [34], предназначенная для «волонтерских» научных вычислений; распределенная сеть BOINC может содержать до миллиона и более активных пользовательских компьютеров, на базе которых организуется коллективный вычислительный кластер.

В последнее время большое внимание уделяется так называемым системам высокой готовности (англ. High Availability Systems), от которых требуется минимизация времени простоя. При этом обычно выделяют четыре уровня готовности [35]:

Уровень готовности, %	Макс. время простоя	Тип системы
99,0	3,5 дня в год	Обычная (Conventional)
99,9	8,5 ч в год	Высокая надежность (High Availability)
99,99	1 ч в год	Отказоустойчивая (Fault Resilient)
99,999	5 мин в год	Безотказная (Fault Tolerant)

Соблюдение этих уровней готовности особенно требуется от корпоративных кластерных систем. При подготовке вычислительного кластера к использованию на предприятии или учреждении возникает проблемная ситуация выбора приложений, для которых использование кластера будет приемлемым или наиболее эффективным по критерию производительности. Поэтому решение подобной проблемы является актуальной научной задачей.

1. Логико-вероятностные и логико-алгебраические модели функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем

1.1. Особенности организации кластерных вычислительных систем

При разработке моделей и реальных приложений использованы логико-вероятностный и логико-алгебраический подходы. Оба подхода основаны на элементах исчисления высказываний, исчисления предикатов первого порядка, алгебре алгоритмов, на методах дискретно-событийного моделирования и создания сетевых приложений.

Первый подход предназначен для создания имитационных статистических моделей функционирования кластерных и других вычислительных систем. При создании статистических моделей используются программные генераторы псевдослучайных чисел с различными законами распределения, а также программы для сбора статистических данных о времени задержек, о загрузке компьютеров.

Второй подход основан на создании предварительных спецификаций прототипного программного обеспечения для реальных приложений. В то же время ряд особенностей функционирования реального программного обеспечения в моделях не учтен, поэтому при программировании моделей следует учитывать возможность появления дополнительных задержек и передач управляющей информации.

В настоящей работе рассматриваются вопросы использования логико-вероятностного и логико-алгебраического подходов при разработке моделей и реальных приложений для вычислительных систем кластерного типа и других вычислительных систем. Логико-вероятностный подход соответствует методике моделирования, получившей название «событийно-управляемое моделирование» (EDM – от англ. *Event-Driven Modeling*). Логико-алгебраический подход тоже используется для построения имитационных моделей, но в первую очередь он предназначен для создания формализованных спецификаций компьютерных программ и в данной работе по аналогии получает название «управляемое моделями программирование» (MDP – *Model-Driven Programming*).

Для лучшего запоминания этих задач также используются метафоры, но, естественно, имеются в виду задачи обработки данных и макроанализа производительности преимущественно кластерных вычислительных систем. Приведены примеры формализации модели «Круглый стол» о случайных парных взаимодействиях процессов в вычислительном кластере, модели «Резидент – агенты», посвященной формализации взаимодействия процесса подготовки заданий для кластера и последовательной загрузки агентов-исполнителей. Задачи «Собрание 1» и «Собрание 2» похожи на предыдущую, но в них задана параллельная и распределенная обработка информации. Анализ характеристик производительности моделируемых систем доведен до численных результатов и работающих приложений в кластере, построенном на основе коммутаторов второго и третьего уровней.

На рис. 1 представлена распространенная структура вычислительной системы, включающей в свой состав вычислительный кластер, условно названный «M1-M16». Узлы этого кластера взаимодействуют между собой через коммутатор K3 по протоколу канального уровня L2. Узлы кластера адресуются по физическим MAC-адресам. Коммутатор K2 используется кластером как резерв, а также для связи с серверами S1-S4. Этот коммутатор может использовать как IP-адреса, так и аппаратные MAC-адреса, брать на себя функцию маршрутизации пакетов. Коммутатор K1 представляет собой коммутатор второго уровня L2+, использующий дополнительные функции, позволяющие работать с IP-адресами [36, 37].

Как было сказано ранее, на основе коммутаторов локальных сетей различных уровней строятся вычислительные кластеры различной производительности – от высокопроизводительных кластеров НРС до массовых недорогих кластеров, иногда называемых кластерами-лоукостерами, т.е. кластерами низкой стоимости. Простота реализации обуславливает широкую распространенность кластеров вычислительных машин. Функциональная архитектура сетевых кластеров обычно строится на основе программного обеспечения различного уровня. Операционные системы узлов кластера не зависят друг от друга. Организация работы кластера начинается обычно с промежу-

точного уровня (уровня *middleware*) и уровня приложений. Работу важных приложений следует рассмотреть подробнее.

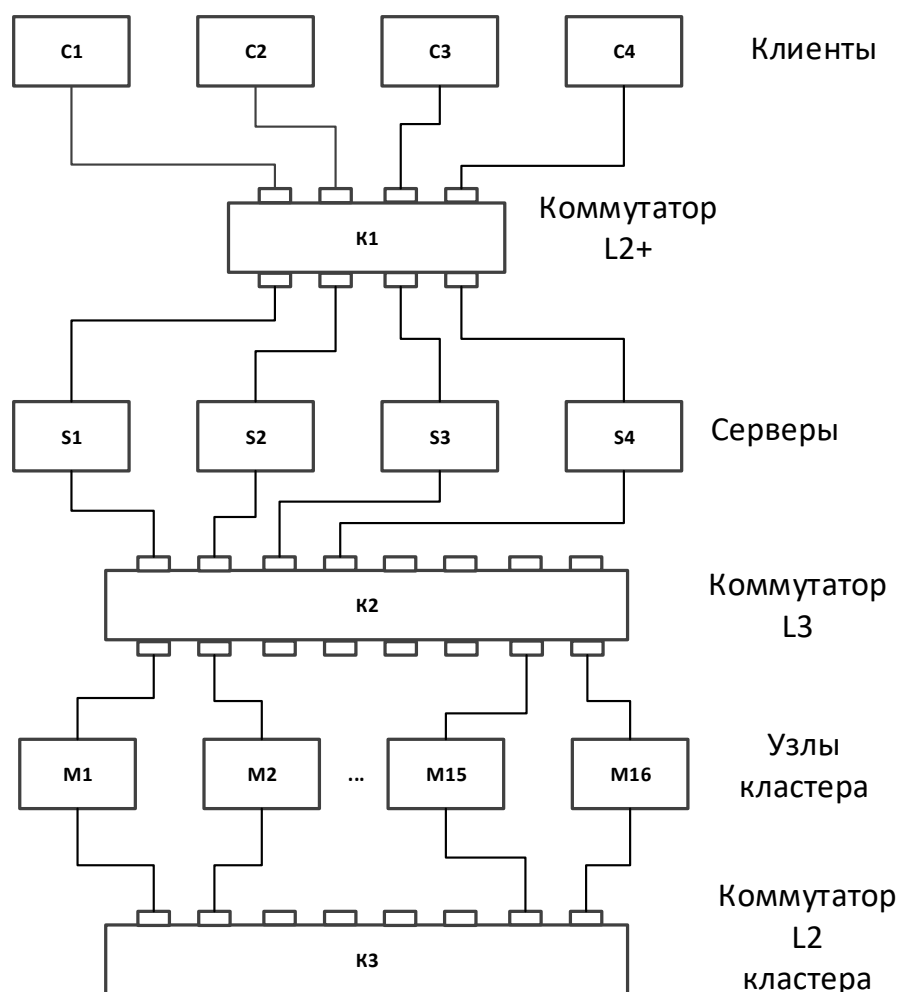


Рис. 1. Сетевая инфраструктура вычислительного кластера «М1-М16»

1.2. Выбор методологического подхода к макро- и микроанализу функционирования вычислительных систем кластерного типа

Имитационная, или поведенческая, модель вычислительного кластера должна быть основана на выборе концептуальной схемы. Концептуальная схема должна базироваться на определенном методологическом подходе. В рамках этого подхода описываются функциональные взаимосвязи системы, т.е. ее функциональная архитектура. Общеизвестно, что методологический подход, выбранный исследователем, позволяет ему четко сформулировать описание системы [38]. Методологический подход в настоящей работе основан на выборе формальных моделей: логических исчислений, таких как исчисление высказываний и предикатов; исполнимых, или операционных моделей, таких как сети Петри и конечные автоматы; модели параллельных, конкурирующих и распределенных вычислений, которые относятся также к тео-

ретическому и прикладному программированию [39–41]. К последнему относятся технологии автоматного программирования [42] и программирования на основе логико-алгебраических спецификаций [43–45].

В дальнейшем речь пойдет о *макро-* и *микроанализе* функционирования вычислительных систем кластерного типа, поэтому проследим возникновение этих терминов на примерах некоторых общенаучных и технических дисциплин. Средства вычислительной техники используются практически во всех сферах деятельности современного человека: привычными стали термины Интернет, интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект. Информатизация общества непрерывно растет, что в свою очередь требует постоянного развития компьютерной техники. Практически все отрасли науки и техники стали смежными по отношению к информатике и вычислительной технике.

Например, в экономике *микроанализ* исследует мотивы и принципы принятия субъектами решений, их взаимодействие [46]. *Макроанализ* позволяет исследовать экономику как систему связей между агрегатами – совокупностями экономических единиц, рассматриваемых как одна обобщенная единица [47]. Техничко-экономический анализ серверов как вычислительных модулей вычислительных систем класса WSC (Warehouse Scale Computer – компьютер хранилища данных) на указанных выше уровнях выполнен в нашей работе [48].

В известной монографии [49] (Э. В. Евреинова и Ю. Г. Косарева) на *макроструктурном* уровне для универсальных вычислительных систем (УВС) различают элементарные машины, коммутаторы и каналы связи. На *микроструктурном* уровне рассматриваются структуры подсистем УВС, состоящие из микроэлементов, под которыми понимаются рассматриваемые как неделимое целое элементы, из которых построены все макроэлементы.

В монографии Б. Байцера «Микроанализ производительности вычислительных систем» [50] определено, что «при *макроанализе* системные характеристики выводятся на основании поведения всей системы... при выполнении *микроанализа* исследования начинаются на самом нижнем уровне».

1.3. Построение логико-вероятностной модели функционирования вычислительного кластера, реализующего равнодоступные парные взаимодействия (модель «Круглый стол»)

Рассматривается задача макроанализа производительности вычислительного кластера в следующей содержательной постановке. В кластере реализуется вычислительный процесс, сопровождаемый межузловым обменом запросами и затребованными данными. Как узлы, отправляющие запросы (узлы-источники), так и узлы, принимающие запросы (узлы-приемники), выбираются в соответствии с заданным распределением вероятностей. Каждый запрос предваряется выполнением некоторой подготовительной программы на узле-отправителе. Ответ на запрос сопровождается выполнением некоторой программы на узле-приемнике запроса. Естественным ограничением является тот факт, что номера узла-источника и узла-приемника не могут совпадать. Запросы, подаваемые с одного и того же узла, могут повторяться, что может привести к задержкам при передаче и подготовке запроса. К задержкам также приводят обращения некоторых узлов-источников к одним и тем

же узлам-приемникам. Таким образом, в вычислительной системе кластерного типа будут взаимодействовать конкурирующие процессы, и образование очередей ожидания не нарушит работу системы.

Рассматриваемый режим работы кластера является важной разновидностью диалоговых взаимодействий в компьютерных сетях. На содержательном уровне постановки задачи можно привести метафорический аналог задачи о круглом столе. Согласно задаче «Круглый стол» в беседе на какую-то научную тему участвуют N ученых. Сразу после оглашения председателем вопроса, подлежащего обсуждению, каждый участник выбирает одного собеседника, готовит вопросы к нему и затем вступает в беседу. В беседах могут участвовать только независимые пары ученых. Председатель переходит к оглашению следующего запроса только тогда, когда все беседы завершены (число «бесед» заранее ограничено). Результатом решения задачи должно быть экспериментально определенное распределение вероятностей (гистограмма) продолжительностей бесед, включающих также и время подготовки (обдумывания) предстоящей и состоявшейся впоследствии беседы.

Формализация решения задачи состоит в следующем построении логико-вероятностной модели функционирования вычислительного кластера, реализующего равнодоступные парные взаимодействия. Предлагается провести формализацию в два этапа. На первом этапе строится логико-вероятностная имитационная поведенческая модель, в которой понятие исполнимости в реальной системе ограничивается некоторыми модулями, работа которых задается распределением вероятностей некоторого интервала времени функционирования. На втором этапе формальное описание модели работы модулей уточняется, что позволяет называть модель логико-алгебраической, пригодной для последующей реализации на ее основе программного приложения, работающего в реальном вычислительном кластере.

Моделирование сложных крупномасштабных систем, к которым относятся и моделирование кластерных вычислительных систем, представляет сложную задачу. Ее особенностью является большое число состояний, что затрудняет использование таких формализмов, как конечные автоматы и сети Петри. Поэтому для решения этой задачи выбрано построение моделей, основанных на исчислении предикатов первого порядка. Отличием от других логических моделей, использующих исчисление предикатов, является приращение модели динамичности за счет использования операций модификации предикатов, определенных на множествах предметной области.

Рассмотрим полный орграф $G = (V, U)$, где V – множество вершин, $U = V^2$ – полное множество дуг, $V^2 = V \times V$. Введем $S_x: V_x \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ – унарный предикат, определенный на подмножестве вершин-источников запросов в кластерной вычислительной системе, $S_y: V_y \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ – унарный предикат, определенный на подмножестве вершин-приемников запросов в кластере; подмножества $V_x \subset V$ и $V_y \subset V$ здесь имеют переменный состав и формируются в процессе моделирования. Истинные значения предикатов S_x и S_y , играющих соответственно роли характеристических функций для подмножеств V_x и V_y , будут соответствовать назначению соответствующих вершин из множества V на участие в передаче данных диалогов от источников к приемникам. Очевидно, что V_x и V_y (согласно постановке задачи) непересекающиеся подмножества ($V_x \cap V_y = \emptyset$) множества V . Предикаты S_x , S_y и мно-

жества V_x , V_y изменяются (эволюционируют) в процессе моделирования, причем на любом этапе моделирования множества V_x и V_y равномощны. Моделирование диалоговой системы «Круглый стол» состоит в формировании последовательности орграфов паросочетаний $H_0, H_1, H_2, \dots, H_m$, имитирующих подключение и отключение участников диалога в кластерной вычислительной системе. Одновременно с этим производится сбор статистических данных, характеризующих загрузку и производительность системы. В теории графов паросочетание, или независимое множество дуг в орграфе, – это набор попарно несмежных дуг. Таким образом, орграфы паросочетаний будут содержать множества некоторых упорядоченных пар (x, y) , где $x \in V_x$, $y \in V_y$, $x \neq y$. Задача моделирования упрощается тем, что x и y ($x \neq y$) выбираются из одного и того же множества V , т.е. из множества участников диалога в кластерной вычислительной системе.

Орграф паросочетаний не может иметь петель, так как полагается, что у участника круглого стола нет необходимости в передаче сообщений самому себе. Если паросочетание орграфа покрывает все его вершины, то это соответствует связи максимального числа пар. Очевидно, что при четном числе вершин n число таких пар максимально и равно $n/2$. Число пар меньше данной величины в случаях, когда наблюдается конфликт запросов при обращении на передачу к одним и тем же приемникам.

Эволюцию орграфов паросочетаний при моделировании предлагается организовать при помощи следующего логико-вероятностного выражения, сочетающего в себе как декларативные, так и процедурные знания о предметной области:

$$\begin{aligned}
 L_0 &= [(\exists_{Any} x \in V \rightarrow S_x(x))][(\exists_{One} (x, y) \in V^2 \rightarrow S_y(y) \& (x \neq y))] \\
 (\{S_x(x) \leftarrow \text{true}, S_y(y) \leftarrow \text{true}, R(x, y) \leftarrow \text{true}, Transfer(x, y) \leftarrow \text{true}, \\
 Delay(x, y) \leftarrow \text{true}, S_x(x) \leftarrow \text{false}, S_y(y) \leftarrow \text{false}, R(x, y) \leftarrow \text{false}, \\
 Delay(x, y) \leftarrow \text{false}, Transfer(x, y) \leftarrow \text{false}\} \vee Ret) \vee Ret), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где в квадратные скобки заключены условия успешного выполнения заданных операторов. В фигурные скобки заключены операции модификации предикатов. Квадратные и фигурные скобки являются элементами синтаксиса выражения (1) и доопределяют его операционную семантику. Оператор $\exists_{Any} x \in V$ – это оператор псевдослучайного выбора будущей вершины x графа паросочетаний H при условии, что ранее эта вершина в граф не входила, т.е. выбор реализуется успешно, если истинно высказывание $\neg S_x(x)$ при конкретном вхождении x . При выполнении данной операции используется генератор целочисленных псевдослучайных величин с заданным законом распределения; вид выбранного распределения вероятностей может задавать приоритетный выбор запросов от участников «Круглого стола». При равномерном распределении моделируется равновероятный выбор запросов. Далее оператор $\exists_{One} (x, y) \in V^2$ осуществляет выбор кортежа (x, y) из декартова произведения $V^2 = V \times V$ с учетом того, что первый элемент кортежа x уже известен в результате предыдущего выбора и истинно высказывание $\neg S_y(y) \& (x \neq y)$. Отметим, что операторы $\exists_{Any}$ и $\exists_{One}$ не удаляют элементы или кортежи из множеств, а лишь предварительно отмечают их в структурах – списках. Включе-

ние или удаление этих элементов осуществляется путем модификации соответствующих предикатов – характеристических функций множеств. В фигурные скобки заключены операции модификации унарных $S_x(x) \leftarrow \text{true}$, $S_y(y) \leftarrow \text{true}$ и бинарного $R(x, y) \leftarrow \text{true}$ предикатов, где значения предметных переменных x, y известны. В результате подобных модификаций добавляются две вершины и инцидентная им дуга в очередной конфигурации графа H паросочетаний. Это построение является ядром моделирующей программы и в дальнейшем используется при реализации программного обеспечения кластерной системы.

Орграф паросочетаний имеет переменную (эволюционирующую) структуру и его текущее состояние формально может быть определено следующим образом:

$$H = (V_x, V_y, S_x, S_y, R). \quad (2)$$

На рис. 2 представлена возможная реализация орграфа паросочетаний с шестью дугами, которые включаются в орграф при моделировании. Шесть дугам соответствуют шесть кортежей (x_1, x_{13}) , (x_4, x_7) , (x_6, x_{14}) , (x_9, x_{16}) , (x_{15}, x_3) и (x_{11}, x_5) , входящих в бинарное отношение R . Это отношение является областью истинности одноименного бинарного предиката. Указанным парам в свою очередь соответствуют истинные высказывания $R(x_1, x_{13})$, $R(x_4, x_7)$, $R(x_6, x_{14})$, $R(x_9, x_{16})$, $R(x_{15}, x_3)$ и $R(x_{11}, x_5)$, где R – бинарный предикатный символ.

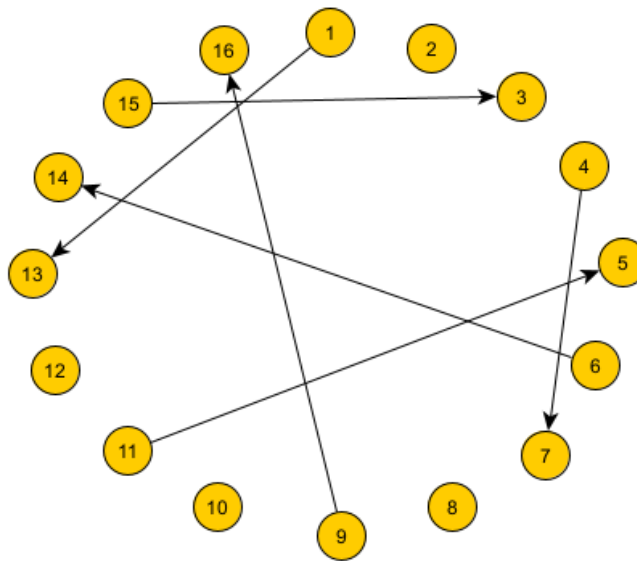


Рис. 2. Возможный вид орграфа паросочетаний с шестью дугами

Остальные дуги в орграфе отсутствуют, поскольку, например, в кластерной системе и в модели произошел случай, когда для свободных узлов-источников сообщений не нашлось адресуемых свободных узлов-приемников. Поэтому реализация орграфа паросочетаний, определенного выражением (2), может иметь изолированные вершины. Орграф паросочетаний на

рис. 3 не имеет изолированных вершин и имеет максимально возможное число дуг – 8.

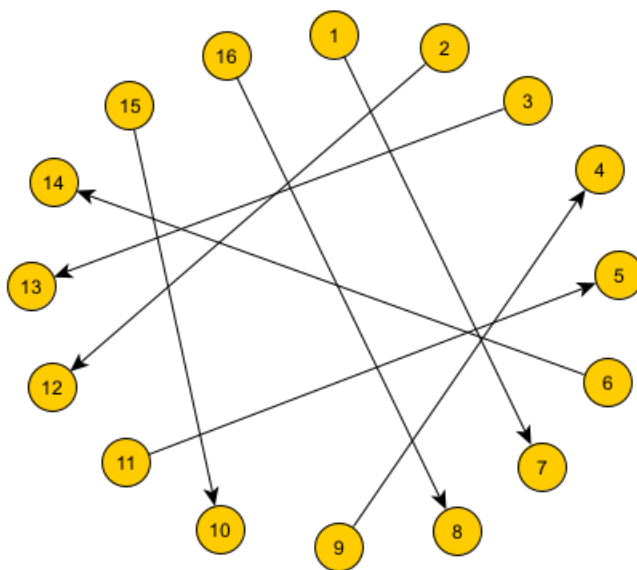


Рис. 3. Орграф паросочетаний с максимальным числом дуг

Продолжаем описание модели, описанной логико-вероятностным выражением (1). Все компоненты кортежа для графа H для этого примера были определены ранее. После добавления очередной дуги в данный граф путем модификаций предикатов $S_x(x) \leftarrow \text{true}$, $S_y(y) \leftarrow \text{true}$, $R(x, y) \leftarrow \text{true}$, $\text{Transfer}(x, y) \leftarrow \text{true}$ выполняется модификация предиката $\text{Delay}(x, y) \leftarrow \text{true}$ – задержки на передачу информации и имитации проведения диалога между источником x и приемником y . В выражении (1) при $\text{Transfer}(x, y) \leftarrow \text{true}$ имитируется передача информации от узла-источника к узлу-приемнику, а при $\text{Transfer}(x, y) \leftarrow \text{false}$ передача заканчивается. По истечении времени задержки связь между источником x и приемником y разрывается, и соответствующая модификация графа паросочетаний выполняется путем удаления дуги (x, y) , где значения предметных переменных x, y известны:

$$S_x(x) \leftarrow \text{false}, S_y(y) \leftarrow \text{false}, R(x, y) \leftarrow \text{false}, \text{Delay}(x, y) \leftarrow \text{false},$$

$$\text{Transfer}(x, y) \leftarrow \text{false},$$

выполнение очередного этапа моделирования заканчивается. В случае, когда одновременный выбор вершин x и y ввиду их занятости невозможен, одна или обе условные части в квадратных скобках выражения (1) не могут быть выполнены успешно, выполняется один или оба оператора Ret , имитирующие отработку тайм-аута и передающие управление на повторные итерации выражения (1). В программной реализации происходит переход в состояние ожидания.

Выражение (1) позволяет строить на основе логико-вероятностного подхода имитационные модели большой размерности, в отличие от исполнимых автоматных моделей или моделей на базе сетей Петри. Например, на ос-

нове данного подхода проведено моделирование кластера «Круглый стол» с 8, 16, 24, 32, 64, 128, 256, 512 и 1024 пользовательскими компьютерами, и при выборках до 10000 прогонов модели время ожидания не превышало 10 с.

Примечание 1. Нотация α -дизъюнкции первоначально была предложена в системах алгоритмических алгебр для формульной записи алгоритмов [44, 51]: $[\alpha](a \vee b)$ – тернарная операция, зависящая от условия α и операторов a и b , используется в настоящей работе для всюду определенных условий. При $\alpha = \mathbf{true}$ выполняется оператор a , а при $\alpha = \mathbf{false}$ – оператор b . Возможны различные суперпозиции α -дизъюнкций, получаемые подстановкой новых операций α -дизъюнкции на место операторов a и b : при $a = [\alpha_2](c \vee d)$ и $b = [\alpha_3](e \vee f)$ результирующее выражение получит следующий вид:

$$[\alpha]([\alpha_2](c \vee d) \vee [\alpha_3](e \vee f)).$$

В настоящей работе используется модификация следующей суперпозиции операций α -дизъюнкций:

$$[\alpha_1]([\alpha_2](\{a_1, a_2, \dots, a_k\} \vee Ret) \vee Ret)).$$

Модификация заключается в том, что вместо пустого оператора E использован оператор возврата с ожиданием Ret (от англ. *return*) к проверке с ожиданием истинности соответствующего ему α -условия в случае его первоначальной ложности. В фигурные скобки заключен блок совместимых операций $\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, в данной работе это элементы своего рода семафорной техники – модификации предикатов, отмечающие происходящие события в моделируемой системе. Символом запятой в блоке обозначена операция конкатенации, или последовательной композиции, операторов, взятая из алгебры операторов системы алгоритмических алгебр [43, 51]. Квадратные, круглые и фигурные скобки являются элементами синтаксиса формул и их нельзя заменять или переносить произвольно. Данная нотация была ранее введена в работах [44, 45, 52].

Отметим, что использование нотации систем алгоритмических алгебр в принципе не является обязательным – возможно использование и других нотаций, позволяющих записывать алгоритмы моделирования в виде формул.

Примечание 2. В формульной записи моделей использованы операторы $\exists_{Any}$ и $\exists_{One}$ выбора кортежей из отношений, нотация и семантика для которых были использованы в работах [44, 45, 52]. Основная форма записи первого из этих операторов имеет следующий вид:

$$\exists_{Any} \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle R_1,$$

где $x_1, x_2, \dots, x_k$ – элементы кортежа – предметные переменные, получающие значения выбранных предметных констант, возможно, входящих в какой-либо кортеж отношения R_1 – области истинности одноименного k -арного предиката. В выражении (1) и других выражениях для формульной записи логико-вероятностных и логико-алгебраических моделей этот оператор заключен в квадратные скобки $[\exists_{Any} \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle R_1]$, которые превращают данный оператор в условие, истинное при успешном завершении операции выбора произвольного кортежа и ложное в противном случае. При построе-

нии логико-вероятностных моделей такой оператор используется часто. Вторым оператором вида $\exists_{One} \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle R_2$ отличается от первого тем, что в отношении R_2 выбранный кортеж должен был быть единственным.

1.4. Переход от имитационной логико-вероятностной модели к логико-алгебраической спецификации функциональной архитектуры вычислительного кластера

Программа имитационного моделирования, созданная на основании логико-вероятностного выражения (1), предназначена для выполнения на одном компьютере в многопоточном режиме. Однако на основе этого выражения путем несложного изменения можно получить выражение, пригодное для спецификации программного обеспечения реальной кластерной вычислительной системы. При этом нужно учесть, что программа должна выполняться в каждом компьютере, подключенном к коммутатору вычислительного кластера. Первый шаг трансформации заключается в том, что выражений, подобных выражению (1), должно быть m – по одному выражению для будущих программ на каждый компьютер кластера. Следующее выражение используется в качестве прототипа спецификации сетевого приложения для i -го компьютера кластера:

$$\begin{aligned}
 M_i = [Start(x_i)](&\{Start(x_i) \leftarrow \text{false}, Master(x_i) \leftarrow \text{true}, Work^*(x_i) \leftarrow \text{true}\} \vee Ret), \\
 &[(\exists_{One}(x_i, y_j) \in V^2) \rightarrow S_y(y_j) \& (x_i \neq y_j)] \\
 &(\{S_x(x_i) \leftarrow \text{true}, S_y(y_j) \leftarrow \text{true}, R(x_i, y_j) \leftarrow \text{true}, Transfer(x_i, y_j) \leftarrow \text{true}, \\
 &Proc^*(x_i, y_j) \leftarrow \text{true}, S_x(x_i) \leftarrow \text{false}, S_y(y_j) \leftarrow \text{false}, R(x_i, y_j) \leftarrow \text{false}, \\
 &Transfer(x_i, y_j) \leftarrow \text{true}, Proc^*(x_i, y_j) \leftarrow \text{false}, \\
 &Master(x_i) \leftarrow \text{false}, Work^*(x_i) \leftarrow \text{false}\} \vee Ret), i, j = 1, 2, \dots, m; i \neq j. \quad (3)
 \end{aligned}$$

От выражения (1) выражение (3) отличается введением индексов i и j , которым в реальном сетевом приложении соответствуют адреса компьютеров, подключенных к коммутатору. Задано новое имя выражения M_i (первая буква от имени *Master*, это означает, что передающий узел кластера получает статус мастера). Введены новые унарные предикаты *Start*, *Master*, *Work**, по-новому интерпретируется бинарный предикат *Proc**. Звездочки при предикатных именах *Work** и *Proc** означают, что при реализации прототипного программного обеспечения кластера этим предикатам соответствуют вычислительные процедуры.

На основании логико-алгебраического выражения M_i строится прототипное программное обеспечение, которое устанавливается на каждый узел вычислительного кластера. При дальнейшем описании там, где это не вызывает противоречий, для упрощения формулировок будут использованы термины как от модели, так и от действующего кластера.

При $Start(x_i) = \text{true}$ начинается работа приложения-мастера на узле x_i кластера, которая отмечается модификациями предикатов $Master(x_i) \leftarrow \text{true}$ и $Work^*(x_i) \leftarrow \text{true}$. С этих событий начинается работа узла-передатчика, получившего статус мастера, т.е. инициатора последующих действий.

Выражение

$$[Start(x_i)](\{Master(x_i) \leftarrow \mathbf{true}, Work^*(x_i) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret) \quad (4)$$

имеет такой смысл: оператор Ret возвращает управление проверке условия $[Start(x_i)]$ при ложности высказывания $Start(x_i)$. От оставшейся части выражения (3) выражение (4) отделено символом запятой, означающим в данном контексте последовательное выполнение последующих действий. Следующая часть выражения начинается с оператора $(\exists_{One}(x_i, y_j) \in V^2)$ выбора единственного кортежа (x_i, y_j) , где x_i соответствует узлу-передатчику, а y_j – узлу-приемнику кластера. Для реализации операции выбора необходимо, чтобы было истинно составное высказывание $\neg S_y(y_j) \& (x_i \neq y_j)$ – узел-приемник y_j кластера не занят, а x_i и y_j – разные узлы. Оператор $\exists_{One}(x_i, y_j)$ путем обращения к коммутатору при известном адресе порта компьютера-источника x_i определяет адрес порта компьютера-приемника y_j . Далее выполняются следующие модификации предикатов $S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{true}$, $S_y(y_j) \leftarrow \mathbf{true}$, которым в реальной кластерной системе соответствуют события занятия узлов x_i и y_j . Модификации предиката $R(x_i, y_j) \leftarrow \mathbf{true}$ соответствует событие связывания узлов x_i и y_j кластера при подготовке с совместным действиям при реализации диалога и обработке данных; модификации предиката $Proc^*(x_i, y_j) \leftarrow \mathbf{true}$ соответствует выполнение операции обработки запроса. Оставшаяся часть выражения (3) описывает события, связанные завершением сеанса связи и с освобождением пары узлов кластера x_i и y_j .

В каждом i -м элементе кластера локально формируется реализация графа паросочетаний H_i , который включает не более одной дуги (x_i, y_j) :

$$H_i = (V_{xi}, V_{yj}, S_{xi}, S_{yj}, R_i); i, j = 1, 2, \dots, m; i \neq j. \quad (5)$$

Завершая описания событий в вычислительном кластере, отметим, что информация, указанная в выражении (3) и затрагивающая узел-приемник y_j , передается в данный узел от узла-мастера x_i при помощи управляющих сообщений. Детали формирования и передачи подобных сообщений в сетевом приложении для кластера просты и не затронуты в формализации.

2. Результаты макроанализа производительности вычислительного кластера на основе логико-вероятностной имитационной модели, задающей равнодоступные парные взаимодействия (модель «Круглый стол»)

2.1. Результаты макроанализа имитационной модели «Круглый стол» в основном режиме

Для режима «Круглый стол» достаточно сложно получить оценки вероятностных характеристик для распределений вероятностей времени подготовки запросов и времени обработки в реальной системе, поскольку нагрузка зависит от множества решаемых задач, времени суток и др. Экспоненциальное распределение предполагает значительную вариабельность переменной и по сравнению с многими распространенными в теории массового обслуживания систем распределений имеет большую дисперсию [38]. Для сравнительного макроанализа кластерных вычислительных систем такие предпосылки

приемлемы, так как они обычно позволяют имитировать работу системы в более жестких условиях. Следует сказать, что при статистическом моделировании можно сменять распределения вероятностей – от произвольных распределений, задаваемых при помощи кусочно-линейных аппроксимаций, до многих других, применяемых при моделировании сложных систем.

Выражения (1), (3), (4) и (5) определяют основную концептуальную схему для разработки имитационной поведенческой модели функционирования вычислительного кластера, реализующего равнодоступные парные взаимодействия (модель «Круглый стол»).

При моделировании далее используются псевдослучайные величины, заданные смещенным экспоненциальным распределением, для которого функция плотности вероятности $f(t)$ имеет следующий вид [38, 53]:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda(t - t_0)) \text{ при } t \geq t_0 \text{ и } 0 \text{ при } t < t_0,$$

где t_0 – параметр смещения; в программе такие псевдослучайные величины генерируются при помощи функции ($\text{expon}(i, t_0, t_{cp})$), где среднее время t_{cp} между событиями в потоке определяется равенством $t_{cp} = 1/\lambda$. Такая функция широко известна в теории вероятностей и массового обслуживания и нередко используется при статистическом моделировании систем, когда приходится оперировать со псевдослучайными величинами, минимальное значение которых ограничено некоторой постоянной величиной t_0 [54]. Функция распределения такой величины имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda(t - t_0)).$$

При проведении экспериментов с имитационной моделью число пар $N \times N$ изменялось от 2×2 до 1024×1024 . Запись вида $N \times N$ означает, что каждым из N узлов кластера организуются случайные парные обмены («беседы») с другими узлами из этого же множества узлов с учетом перечисленных ранее ограничений, связанными к конфликтами и образованием очередей. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований имитационной модели кластера, работающего в режиме «Круглый стол»

$N_{п/п}$	Число пар $N \times N$	T_{Pair} , мс	T_1 , мс	K_{Slow}
1	2×2	411	220	1,87
2	4×4	614	220	2,8
3	8×8	803	220	3,65
4	16×16	980	220	4,45
5	24×24	1077	220	4,9
6	32×32	1150	220	5,22
7	48×48	1240	220	5,63
8	64×64	1300	220	5,9
9	128×128	1449	220	6,59
10	256×256	1595	220	7,25
11	512×512	1732	220	7,87
12	1024×1024	1870	220	8,5

Предполагалось, что время подготовки запроса («обдумывания темы беседы») распределено в соответствии со смещенным экспоненциальным распределением с параметрами $t_{cp} = 100$ мс, $t_0 = 10$ мс. Время обработки запроса определено теми же параметрами. В результате моделирования определялось значение главного параметра – времени T_{Pair} обслуживания запроса, включающего время его подготовки. Значения этого времени, оцененные по результатам статистического эксперимента, указаны в 3-й колонке табл. 1. Интерес также представляло соотношение между реальным временем T_{Pair} и «идеальным» T_1 , которое было бы равно $2(t_{cp} + t_0) = 220$ мс в случаях, когда граф паросочетаний имел бы N дуг при бесконфликтной ситуации. Коэффициент замедления обслуживания из-за взаимного влияния запросов равен $K_{Slow} = T_{Pair} / T_1$. При учете этого коэффициента возможно оценить работу кластера при наличии случайных парных взаимодействий. Рисунки 4 и 5 наглядно иллюстрируют влияние зависимости запросов друг от друга при наличии конфликтов и очередей. Моделирование производилось при изменении $N = 2, 4, 8, 16, 24, 32, 48, 64, 128, 256, 512, 1024$; число портов N_P коммутатора равно N , объем выборки составлял 10 000. Подтверждено, что благодаря организации очередей в коммутаторе кластерная система в режиме «Круглый стол» может работать без тупиков.

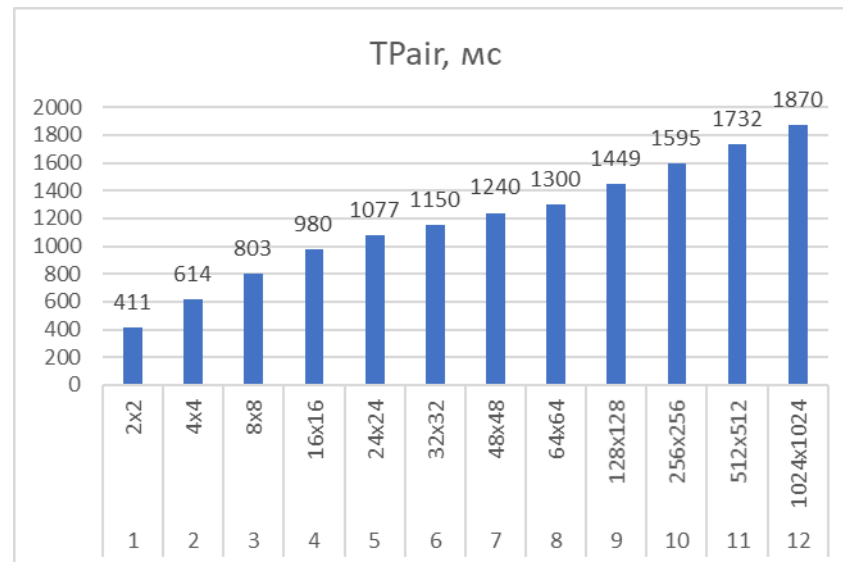


Рис. 4. Зависимость среднего времени обработки запроса T_{Pair} от числа узлов N в вычислительном кластере

На рис. 6 приведены гистограммы распределения времени обработки запросов T_{Pair} . Слева от каждой гистограммы указано число узлов. Гистограммы, как графические представления данных, позволяют наглядно визуализировать распределение частот величины времени обработки запроса. Из рисунков видно, что гистограммы имеют длинные «хвосты», это свидетельствует о наличии выбросов или экстремальных значений времени обработки запроса. Однако эти отклонения достаточно редки и не оказывают значительного влияния на работу вычислительного кластера в режиме «Круглый стол».

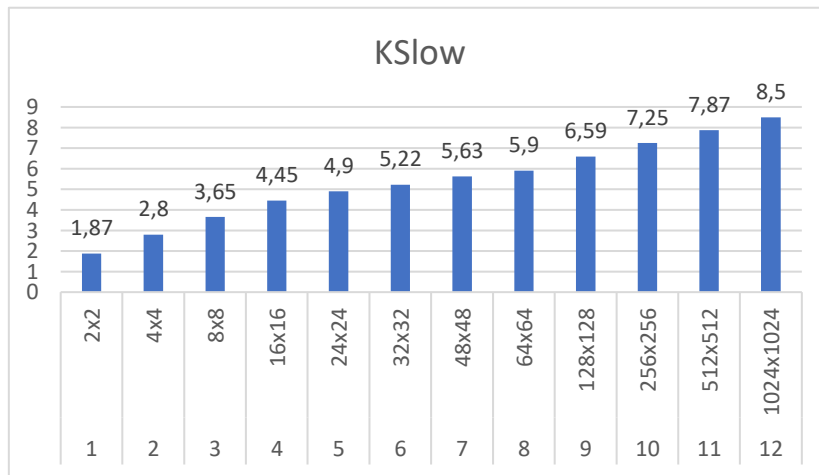


Рис. 5. Зависимость коэффициента замедления обработки запроса K_{Slow} от числа узлов N в вычислительном кластере

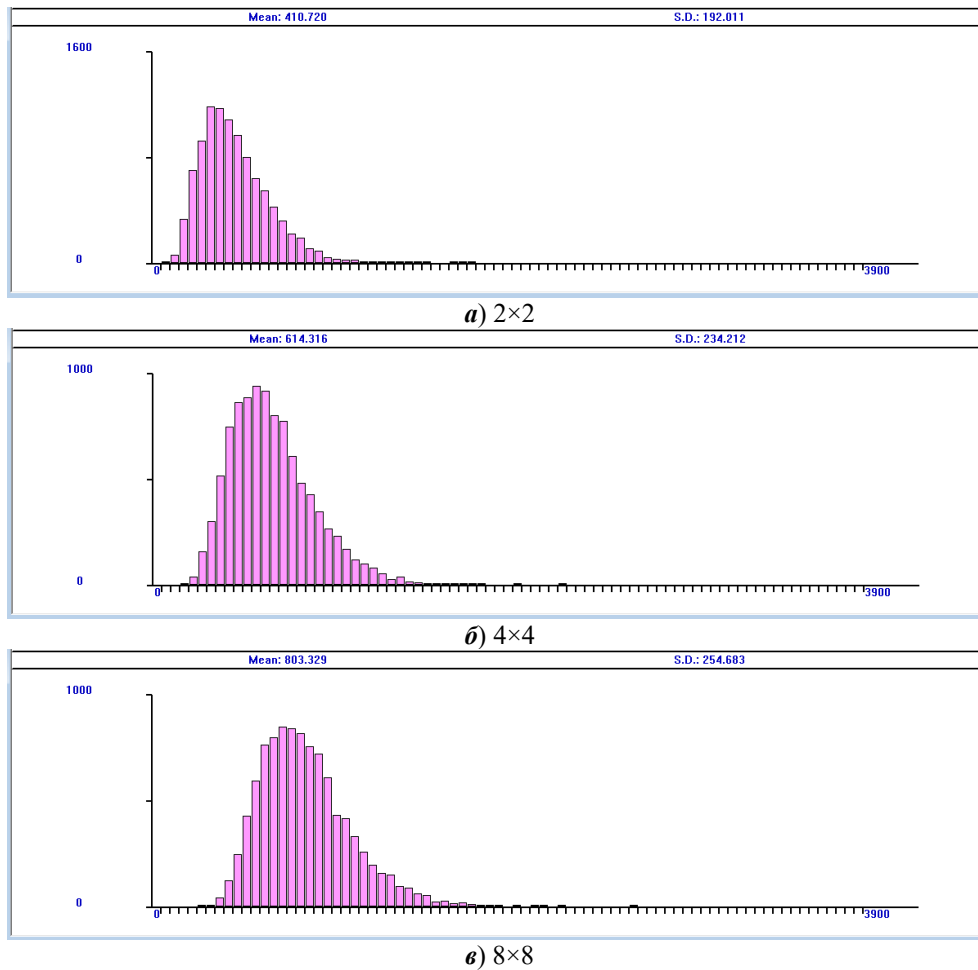
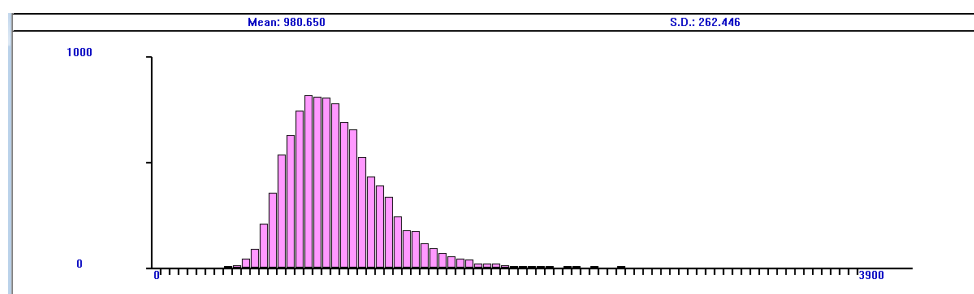
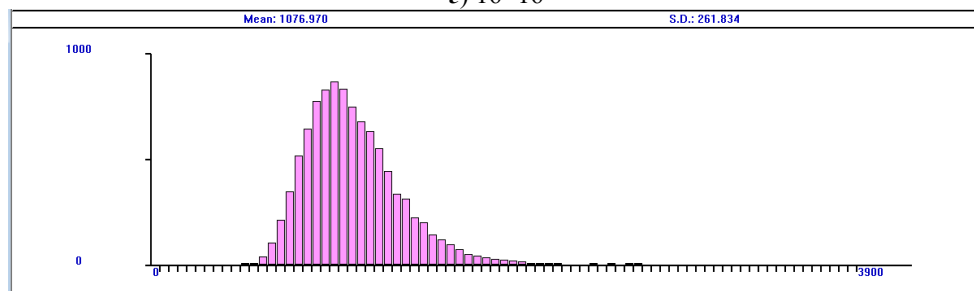


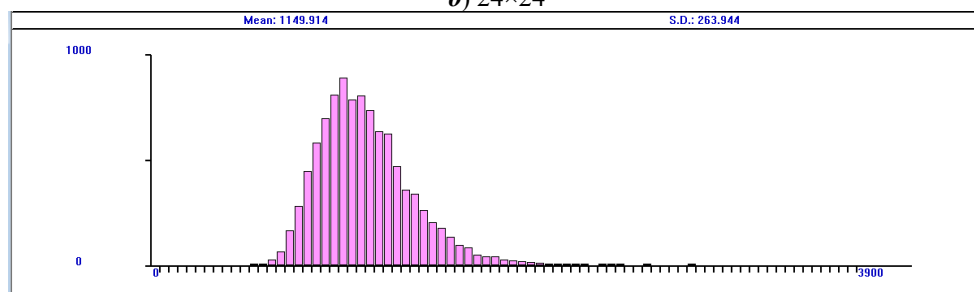
Рис. 6. Гистограммы распределения времени обработки запросов T_{Pair}



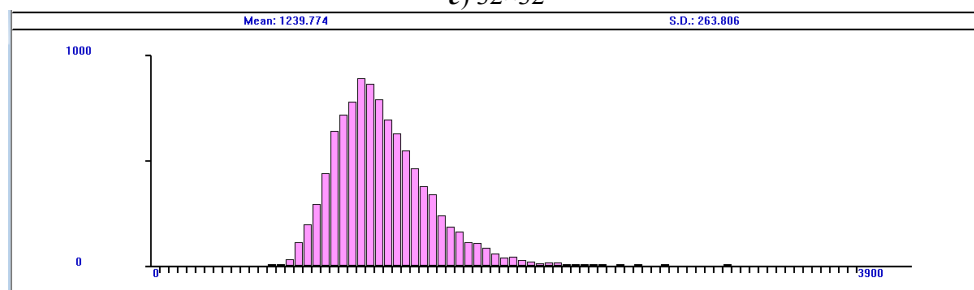
з) 16×16



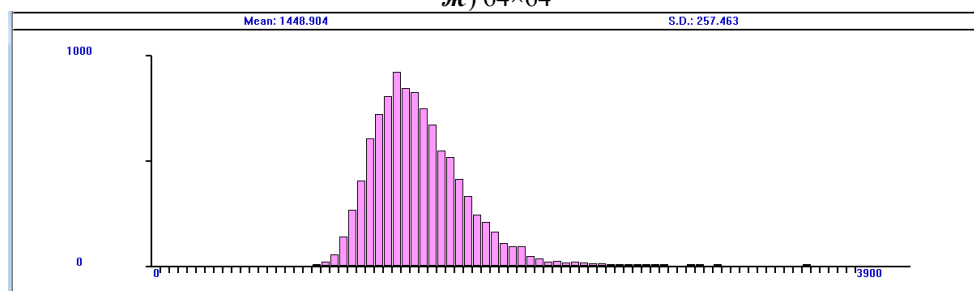
д) 24×24



е) 32×32



ж) 64×64



и) 128×128

Рис. 6. Продолжение

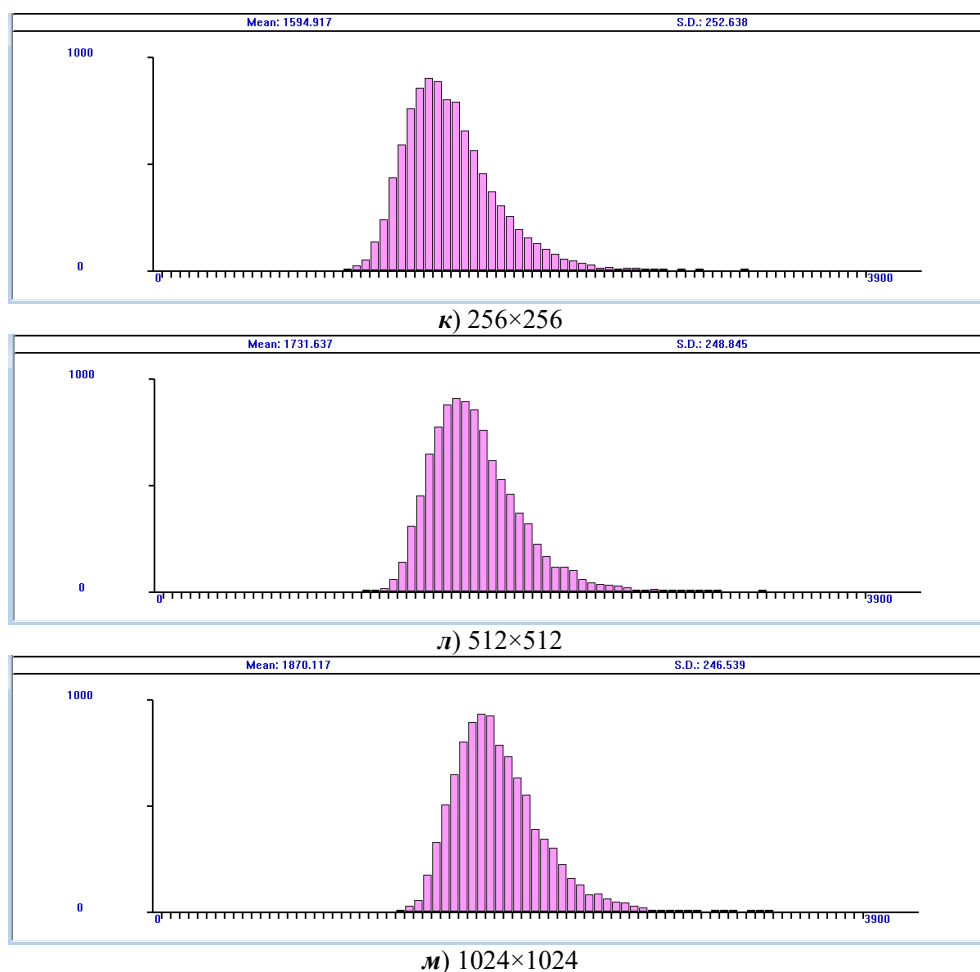


Рис. 6. Окончание

2.2. Результаты макроанализа имитационной модели «Круглый стол» при ограничении числа портов коммутатора локальной сети

Следующий этап макроанализа функционирования вычислительного кластера по построенной имитационной логико-вероятностной модели будет связан с выбором числа портов коммутатора. Для этого выберем $N = 1024$ и проведем эксперименты с моделью при изменяющемся числе портов N_p . Результаты испытаний сведены в табл. 2. Как и ранее, запись вида $N \times N$ означает, что каждым из N узлов кластера организуются случайные парные обмены с другими узлами из этого же множества.

Как и следовало ожидать, с убыванием числа портов коммутатора кластера среднее время T_{Pair} подготовки и обработки запросов увеличивается. При числе портов 256, 512, 1024 значения T_{Pair} сохраняются почти равными, при этом максимальное число занятых портов приблизительно равно максимальному числу «беседующих» пар (≈ 200). При дальнейшем уменьшении числа портов N_p время T_{Pair} увеличивается. Таким образом, пользователь кластера на основании таблиц 1 и 2 может оценить время T_{Pair} подготовки и обработки запросов и выбрать необходимое число портов коммутатора класте-

ра. Рисунки 7 и 8 наглядно иллюстрируют влияние числа портов N_p на важнейшую характеристику производительности T_{Pair} .

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований
имитационной модели кластера, работающего в режиме
«Круглый стол», при изменении числа портов коммутатора

$N_{п/п}$	Число пар $N \times N$	Кол-во портов N_p	T_{Pair} , мс	K_{Lim}
1	1024×1024	1024	1870	1
2	1024×1024	512	1873	1
3	1024×1024	256	1873	1
4	1024×1024	128	1905	1,02
5	1024×1024	64	2440	1,21
6	1024×1024	32	4017	2,15
7	1024×1024	24	5130	2,74
8	1024×1024	16	7404	3,96
9	1024×1024	8	14339	7,67

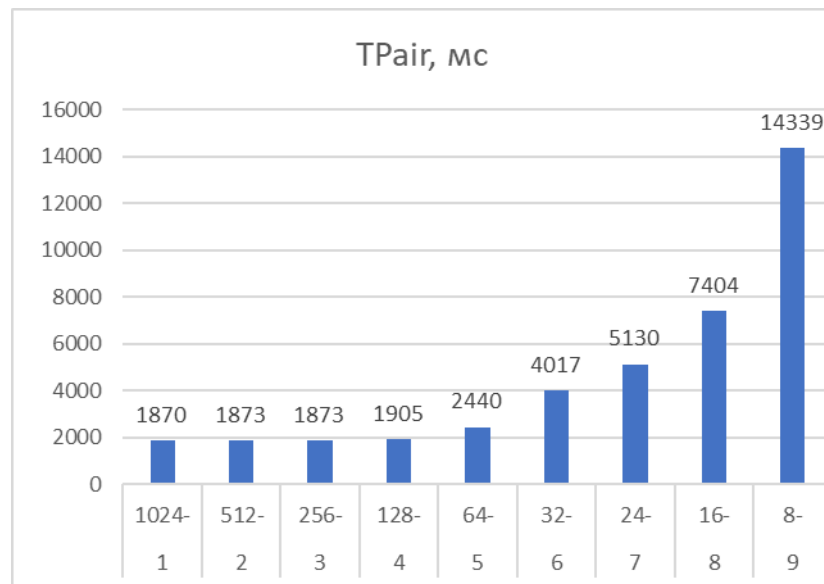


Рис. 7. Зависимость среднего времени обработки запроса T_{Pair} от числа N_p портов коммутатора при числе пар $N \times N = 1024 \times 1024$

Значения коэффициента K_{Lim} вычисляются как отношения времени обработки T_{Pair} при $N_p < 1024$ к наименьшему значению этого же параметра при $N_p = 1024$. Например, $K_{Lim,8} = T_{Pair,8} / T_{Pair,1024} = 14339 / 1870 = 7,67$.

На рис. 9 представлены гистограммы распределения времени T_{Pair} при $N = 1024$ и различных значениях числа портов N_p коммутатора СОМ. Из рисунков, как и в предыдущем случае, видно, что гистограммы имеют длинные «хвосты», что свидетельствует о наличии выбросов или экстремальных значений времени обработки запроса. Однако эти отклонения достаточно редки и не оказывают значительного влияния на работу вычислительного кластера в режиме «Круглый стол».

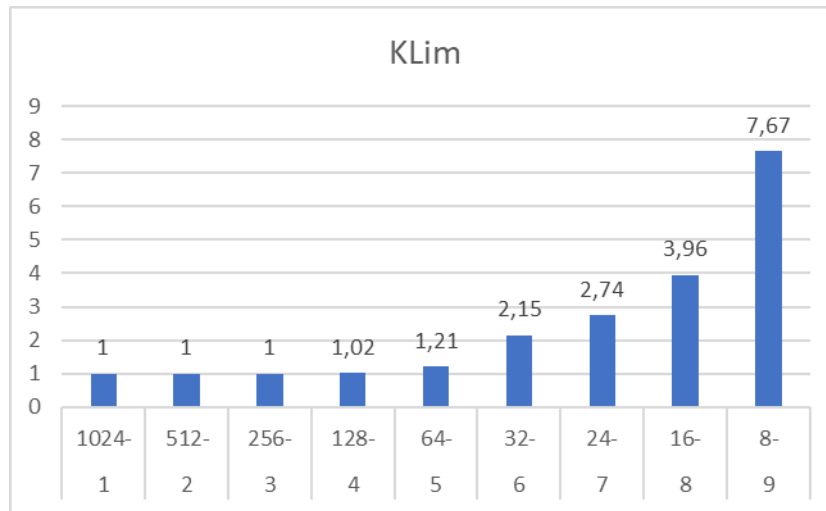


Рис. 8. Зависимость коэффициента замедления обработки запроса K_{Lim} от числа N_P портов коммутатора при числе пар $N \times N = 1024 \times 1024$

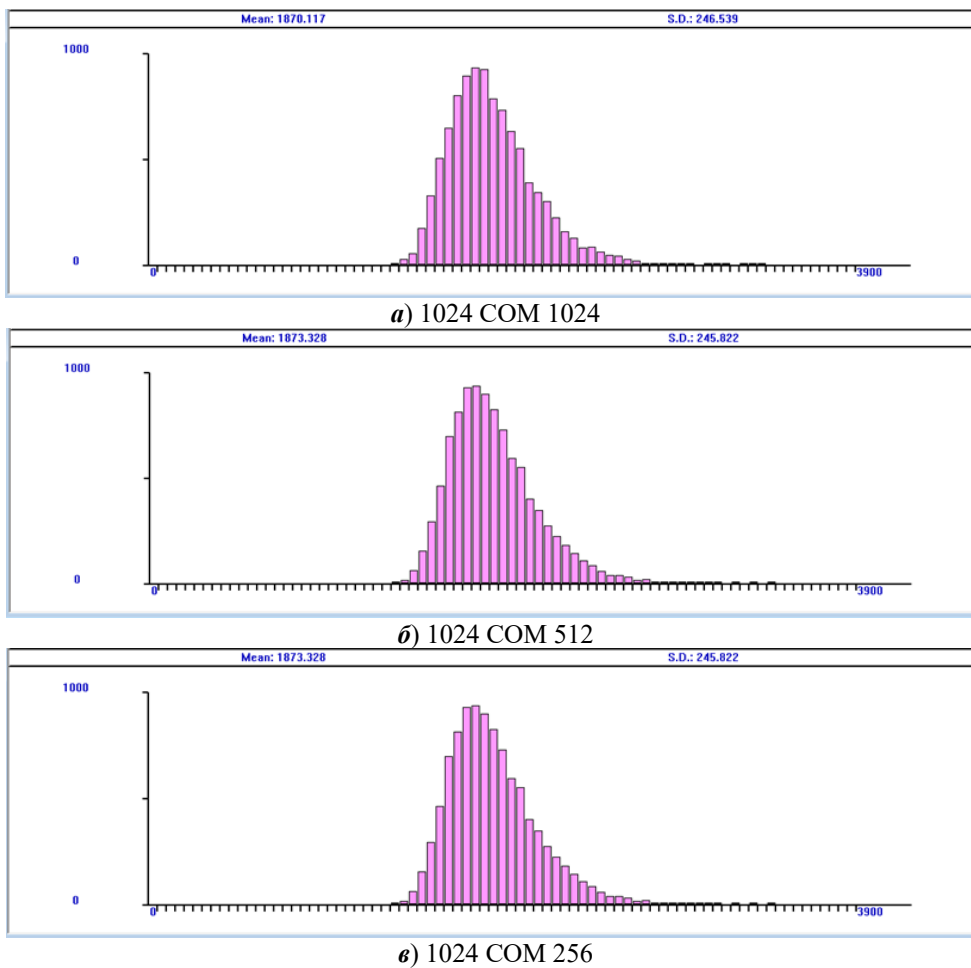


Рис. 9. Гистограммы распределения времени T_{Pair}

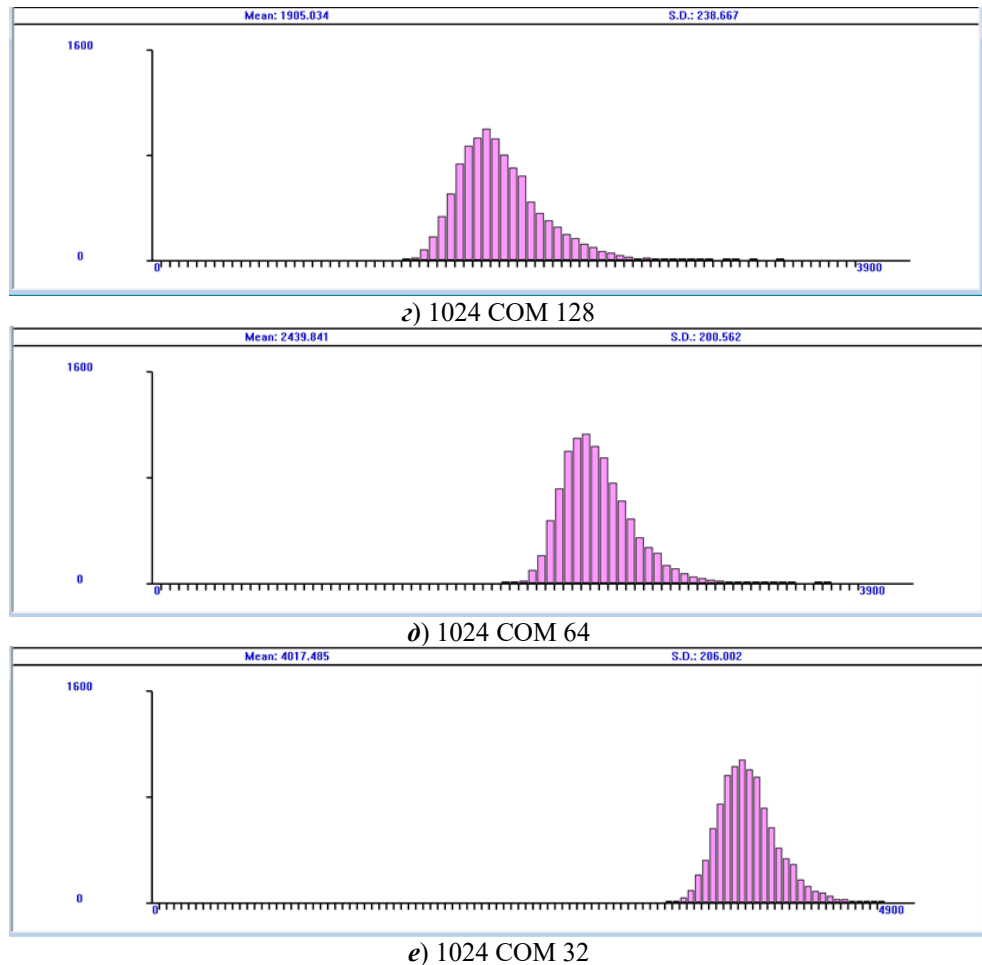


Рис. 9. Окончание

2.3. Логико-вероятностная модель «Резидент – агенты»: последовательная раздача заданий – последовательное выполнение

Пусть теперь предметная константа x_0 представляет в модели ведущий компьютер кластера, условно названный «резидентом», а множество $V = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ представляет агенты – «рядовые» машины кластера. Обозначим через $Q = \{x_0\} \times V$ множество всех пар вида (x_0, x_i) , $i = 1, 2, \dots, m$, тогда модификации бинарного предиката $R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}$ в модели соответствует включение дуги (x_0, x_i) в граф C устанавливаемых межузловых связей в кластере, а модификации $R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}$ соответствует удаление дуги (x_0, x_i) . Выборку кортежа (x_0, x_i) из отношения Q осуществляет оператор $\exists_{one}(x_0, x_i) \in Q$. Остальные предикаты в выражении (6) имеют такой же смысл, как и в определениях моделей (1) и (3). Модификации унарного предиката *Resident* соответствует инициирование и завершение работы ведущего компьютера кластера:

$$M_0 = [Start(x_0)](\{Resident(x_0) \leftarrow \mathbf{true}, Work^*(x_0) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret),$$

$$\begin{aligned}
& SeqReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \neg S_x(x_i)] \\
& (\{S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, \\
& Work^*(x_i) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee Ret)), Resident(x_0) \leftarrow \mathbf{false}). \quad (6)
\end{aligned}$$

Отличительной особенностью формулы (6) является использование оператора репликации $SeqReplicate(i = 1..m)$, которая в формуле означает последовательную репликацию (повторение) записи формулы, заключенной в скобки слева, с последовательной подстановкой индексированных переменных:

$$\begin{aligned}
& ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \neg S_x(x_i)] \\
& (\{S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, \\
& Work^*(x_i) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee Ret)). \quad (7)
\end{aligned}$$

В прототипной программе, управляющей согласно формуле (6) работой всего кластера, реплицируемой части данной формулы соответствует исполняемая циклически часть программы.

В выражении (6) считалось, что рабочие программы элементов кластера уже загружены. Однако во многих случаях требуется выполнение первоначальной загрузки, проводимой последовательно для всех элементов или параллельно, одновременно для всех элементов кластера.

При последовательной загрузке элементов кластера и логико-алгебраическом и последовательном выполнении рабочих программ выражение M_{SeqSeq} будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
M_{SeqSeq} = & [Start(x_0)](\{Start(x_0) \leftarrow \mathbf{false}, Resident(x_0) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& Work^*(x_0) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret), \\
& SeqReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \neg S_x(x_i)] \\
& (\{S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, Load^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, Load^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, \\
& Work^*(x_i) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee Ret)), Resident(x_0) \leftarrow \mathbf{false}), \\
& [Start(x_0)](\{Start(x_0) \leftarrow \mathbf{false}, Resident(x_0) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& Work^*(x_0) \leftarrow \mathbf{true}, Start(x_0) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret), \\
& SeqReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \neg S_x(x_i)] \\
& (\{Start(x_0) \leftarrow \mathbf{false}, S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{true}, \\
& S_x(x_i) \leftarrow \mathbf{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \mathbf{false}, \\
& Work^*(x_i) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee Ret)), Resident(x_0) \leftarrow \mathbf{false}). \quad (8)
\end{aligned}$$

Здесь бинарный предикат *Load* моделирует процедуру начальной загрузки каждого элемента кластера.

2.4. Построение логико-вероятностных моделей функционирования вычислительного кластера, реализующего параллельный доступ «Один ко многим» (модели «Собрание 1» и «Собрание 2»)

Следующий важный режим связан с параллельной обработкой информации в кластерной вычислительной системе. В режиме «Собрание 1» ведущий компьютер кластера подготавливает данные, а затем передает их для последующей параллельной обработки в ведомых компьютерах. Метафорическое название новой модели – «Собрание 1», где «председатель» (*Chairman*) подготавливает и раздает последовательно задания участникам (режим репликации – *SeqReplicate*($i = 1..m$)). Новая логико-алгебраическая модель $C_{Seq,Par}$ (9) построена путем переинтерпретации предыдущей модели (8) и изменения режима выполнения загруженных программ кластером с последовательного на параллельный (но при последовательной загрузке программ и данных на каждый элемент кластера):

$$\begin{aligned}
 C_{Seq,Par} = & [Start(x_0)](\{ Start(x_0) \leftarrow \text{false}, Chairman(x_0) \leftarrow \text{true}, \\
 & Work^*(x_0) \leftarrow \text{true} \} \vee Ret), \\
 & SeqReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \rightarrow S_x(x_i)] \\
 & (\{S_x(x_i) \leftarrow \text{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, Load^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, \\
 & S_x(x_i) \leftarrow \text{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, Load^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, \\
 & Work^*(x_i) \leftarrow \text{false} \} \vee Ret)), Chairman(x_0) \leftarrow \text{false}), \\
 & [Start(x_0)](\{Start(x_0) \leftarrow \text{false}, Chairman(x_0) \leftarrow \text{true}, \\
 & Work^*(x_0) \leftarrow \text{true}, Start(x_0) \leftarrow \text{true} \} \vee Ret), \\
 & ParReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \rightarrow S_x(x_i)] \\
 & (\{Start(x_0) \leftarrow \text{false}, S_x(x_i) \leftarrow \text{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, \\
 & Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, \\
 & S_x(x_i) \leftarrow \text{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, \\
 & Work^*(x_i) \leftarrow \text{false} \} \vee Ret)), Chairman(x_0) \leftarrow \text{false}). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Здесь *ParReplicate*($i = 1..m$) – оператор параллельной репликации выражения, записанного справа от него в круглых скобках, что представлено в рабочей программе репликацией частей программы, соответствующей каждому выражению. Таких частей будет m , по одной на каждый ведомый компьютер. Поскольку полагается, что все реплики для выражения (9) независимы друг от друга, то все отношения, используемые в этом выражении, сегментируются, и каждый сегмент входит в реплику, т.е. затем в реализованное программно выражение. Например, при $i = 2$ в программу для 2-го компьютера кластера входят кортежи $\langle x_2 \rangle$ и $\langle x_0, x_2 \rangle$. Передача и сбор результатов вычислений от каждого из m ведомых компьютеров сопровождается событи-

ем модификации предиката $Chairman(x_0) \leftarrow \text{false}$ в ведущем компьютере кластера.

Режим работы «Собрание 2». При возможной реализации параллельной первоначальной загрузки рабочих программ в элементы кластера в параллельном широкополосном режиме логико-алгебраическая модель $C_{Seq,Par}$ (9) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned}
 C_{Par,Par} = & [Start(x_0)](\{ Start(x_0) \leftarrow \text{false}, Chairman(x_0) \leftarrow \text{true}, \\
 & Work^*(x_0) \leftarrow \text{true} \} \vee Ret), \\
 & ParReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \neg S_x(x_i)] \\
 & (\{S_x(x_i) \leftarrow \text{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, Load^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, \\
 & S_x(x_i) \leftarrow \text{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, Load^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, \\
 & Work^*(x_i) \leftarrow \text{false} \} \vee Ret)), Chairman(x_0) \leftarrow \text{false}), \\
 & [Start(x_0)](\{Start(x_0) \leftarrow \text{false}, Chairman(x_0) \leftarrow \text{true}, \\
 & Work^*(x_0) \leftarrow \text{true}, Start(x_0) \leftarrow \text{true} \} \vee Ret), \\
 & ParReplicate(i = 1..m): ([(\exists_{One}(x_0, x_i) \in Q) \neg S_x(x_i)] \\
 & (\{Start(x_0) \leftarrow \text{false}, S_x(x_i) \leftarrow \text{true}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, \\
 & Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{true}, \\
 & S_x(x_i) \leftarrow \text{false}, R(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, Proc^*(x_0, x_i) \leftarrow \text{false}, \\
 & Work^*(x_i) \leftarrow \text{false} \} \vee Ret)), Chairman(x_0) \leftarrow \text{false}). \quad (10)
 \end{aligned}$$

Выражения (6)–(10) возможно отнести к классу логико-алгебраических спецификаций к программному обеспечению уровня *middleware* кластерной системы. Эту же роль, но на начальных этапах работ по организации функционирования кластера, выполняют логико-вероятностные модели. По завершении этапа формализации моделей вычислительных кластеров необходимо перейти собственно к этапу макроанализа их производительности на основе проведения статистических экспериментов.

2.5. Результаты статистического моделирования к задачам организации функциональной архитектуры вычислительного кластера, работающего в режимах «Резидент – агенты» и двух вариантах режима «Собрание»

На основе логико-вероятностных и логико-алгебраических моделей построены имитационные поведенческие модели, позволяющие получить главные характеристики производительности – оценки среднего времени выполнения запроса, гистограммы распределения времени выполнения запроса. Определены следующие оценки математического ожидания времени выполнения запросов в вычислительном кластере:

T_{seq} – оценка математического ожидания времени выполнения запроса в режиме последовательной загрузки всех узлов кластера и дальнейшей последовательной же обработки запросов (режим «Резидент-агенты»);

T_{sp} – оценка математического ожидания времени выполнения запросов в режиме последовательной загрузки всех узлов кластера и дальнейшей параллельной обработки запросов всеми узлами кластера (режим «Собрание 1»);

T_{pp} – оценка математического ожидания времени выполнения запроса в режиме параллельной загрузки всех узлов кластера и дальнейшей параллельной обработки запросов всеми узлами кластера (режим «Собрание 2»).

Время загрузки программ в узлы кластера выбрано равным 10 мс; время обработки запроса задается смещенным экспоненциальным распределением [38, 54]:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda(t - t_0)) \text{ при } t \geq t_0 \text{ и } 0 \text{ при } t < t_0,$$

с параметрами $t_{cp} = 500$ мс, $t_0 = 100$ мс.

В табл. 3 представлены результаты статистических экспериментов с имитационными моделями вычислительного кластера, работающего в режимах «Резидент – агенты», «Собрание 1» и «Собрание 2». Кроме указанных выше оценок математических ожиданий времен обработки запросов (при учете времени загрузки обрабатывающих программ и данных) T_{seq} , T_{sp} и T_{pp} , приведены значения коэффициентов относительного выигрыша от организации параллельных режимов загрузки и обработки заданий в кластере:

$$K_{seq/sp} = T_{seq} / T_{sp},$$

$$K_{seq/pp} = T_{seq} / T_{pp},$$

$$K_{sp/pp} = T_{sp} / T_{pp}.$$

Таблица 3
Результаты экспериментальных исследований имитационной модели кластера при работе в режимах «Резидент – агенты», «Собрание 1» и «Собрание 2»

Число узлов	Оценка среднего времени выполнения задания в кластере из N узлов			Относительный выигрыш по времени выполнения задания		
	T_{seq}	T_{sp}	T_{pp}	$K_{seq/sp}$	$K_{seq/pp}$	$K_{sp/pp}$
1	613	615	617	1,0	1,0	1,0
2	1227	881	871	1,39	1,41	1,01
4	2439	1186	1156	2,06	2,12	1,02
8	4873	1543	1473	3,16	3,31	1,05
16	9768	1950	1796	5,0	5,50	1,09
32	19516	2451	2141	7,96	9,11	1,14
64	39021	3114	2484	12,5	15,7	1,25
128	78056	4104	2835	19,0	27,5	1,45
256	156059	5722	3172	27,3	49,2	1,82
512	312174	8632	3522	36,2	88,6	2,45
1024	624333	14090	3860	44,3	161,7	3,65

Проведенный макроанализ производительности показывает, что при реализации указанных режимов настоятельно необходимо организовать параллельную работу как при загрузке программ и данных на узлы кластера, так и, особенно, при обработке запросов. Диаграммы, показывающие зависимость коэффициентов относительного выигрыша при переходе к параллельным режимам работы, приведены на рис. 10–12. Необходимость перехода

к параллельным режимам работы узлов кластера особенно важна при большом числе его узлов.

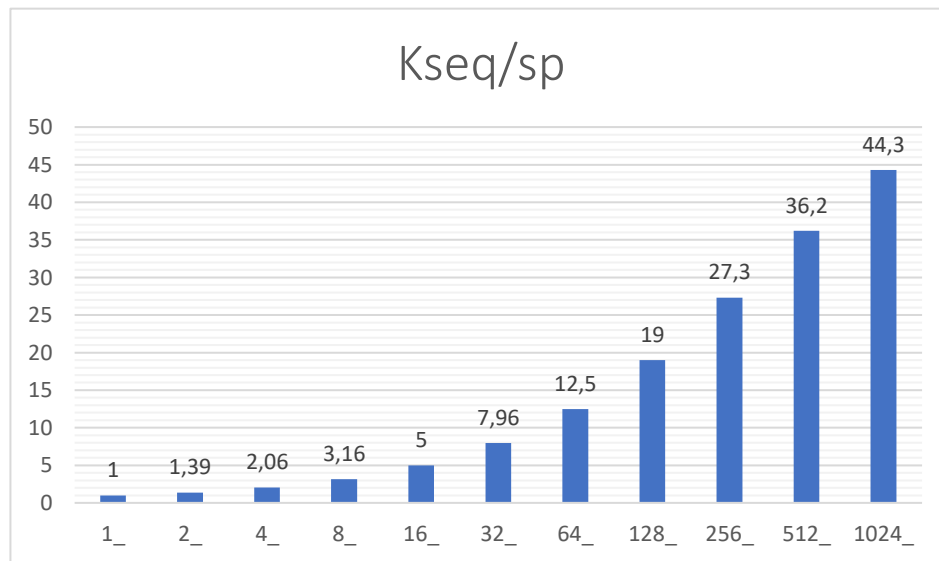


Рис. 10. Зависимость относительного выигрыша $K_{seq/sp}$ по времени подготовки и обработки запросов при переходе от последовательной загрузки и последовательной обработки запросов к последовательной загрузке и параллельной обработке запросов

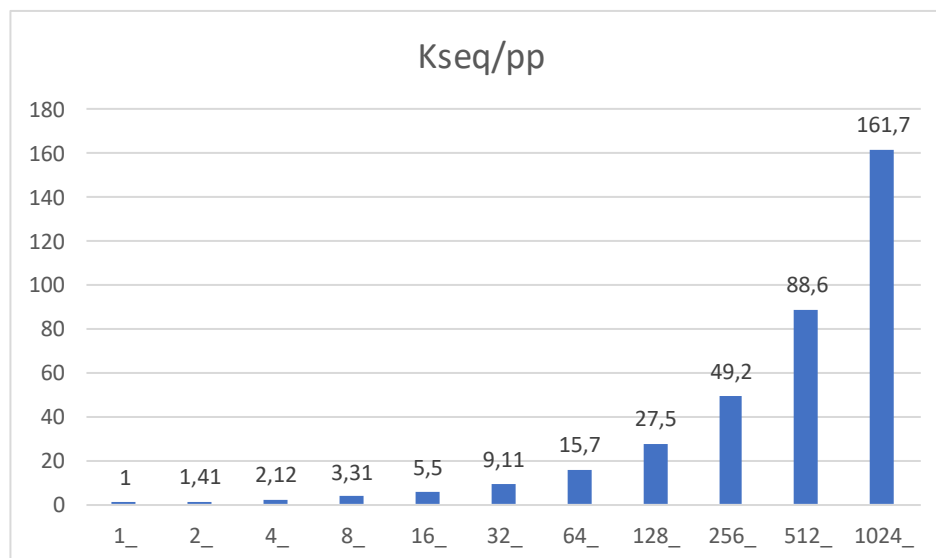


Рис. 11. Зависимость относительного выигрыша $K_{seq/pp}$ по времени подготовки и обработки запросов при переходе от последовательной загрузки и последовательной обработки запросов к параллельной загрузке и параллельной обработке запросов

На рис. 13 представлены гистограммы для времени обработки заданий в предметно-ориентированной кластерной вычислительной системе при различных режимах использования.

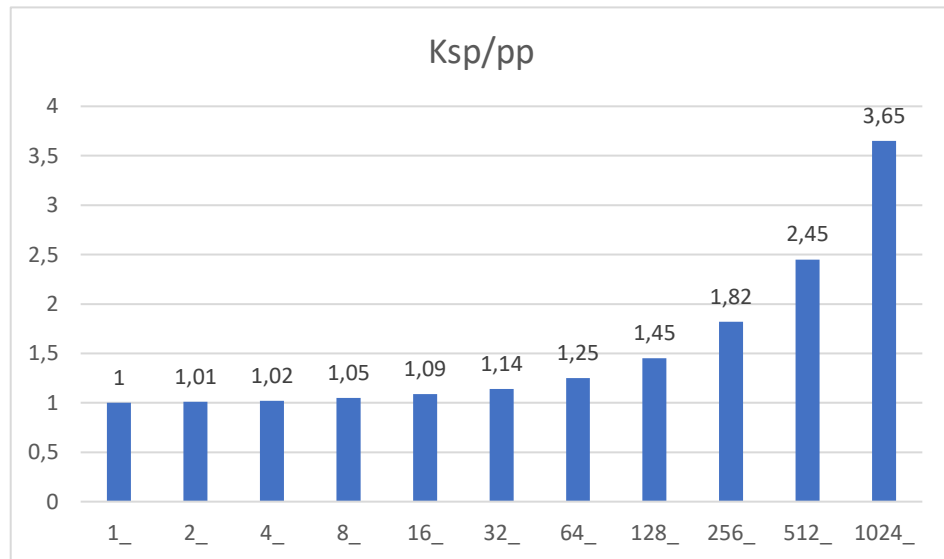
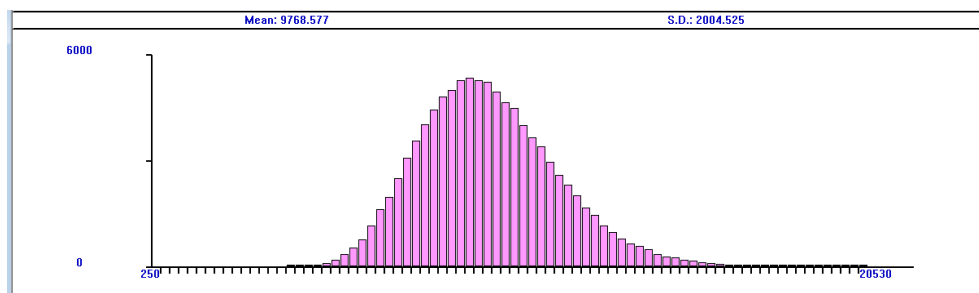
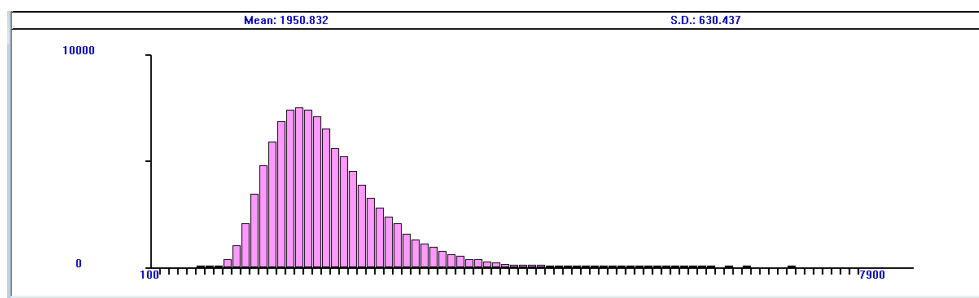


Рис. 12. Зависимость относительного выигрыша $K_{sp/pp}$ по времени подготовки и обработки запросов при переходе от последовательной загрузки и параллельной обработки запросов к параллельной загрузке и параллельной обработке запросов

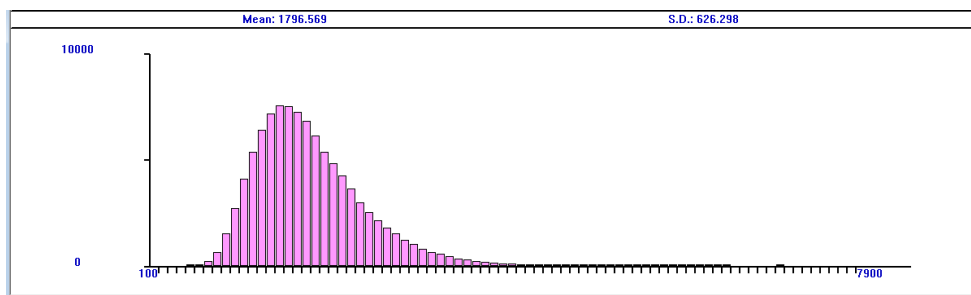


а) кластер из 16 машин; режим работы «seq» последовательной загрузки и последовательного выполнения заданий; цена деления – 250 мс; объем выборки – 100 000



б) кластер из 16 машин; режим работы «sp» последовательной загрузки и параллельного выполнения заданий; цена деления – 100 мс; объем выборки – 100 000

Рис. 11. Гистограммы для времени обработки заданий в предметно-ориентированной кластерной вычислительной системе при различных режимах использования



в) кластер из 16 машин; режим работы «пр» параллельной загрузки и параллельного выполнения заданий; цена деления – 100 мс; объем выборки – 100 000

Рис. 11. Окончание

Обращают на себя внимание длинные «хвосты» распределений времени обслуживания запросов, что, как и в предыдущих случаях, свидетельствует о наличии выбросов или экстремальных значений времени обработки запроса. Однако эти отклонения достаточно редки и не оказывают значительного влияния на работу вычислительного кластера в режимах «Резидент – агенты», «Собрание 1» и «Собрание 2».

2.6. Рекомендации по организации работы кластера при загрузке и выполнении рабочих программ и данных

При работе кластера в режиме «Круглый стол» реализуется диалоговое взаимодействие пар узлов, необходимость в широковещании отсутствует, поэтому нет необходимости в дополнительной информации к описанию. Работа вычислительного кластера в режимах «Резидент – агенты», «Собрание 1» и «Собрание 2» предполагает использование, в свою очередь, режимов запуска SPMD и MPMD параллельных программ [1, 18, 24]. При работе в режиме SPMD (*Single Program Multiple Data* – одна программа, множество данных) создается единая для всех узлов кластера (или для всех потоков при многопоточных узлах) программа [1, 18]. Копии этой программы загружаются параллельно с управляющего узла или с сервера (см. рис. 1) на каждый рабочий узел кластера. У каждого узла (или потока) имеется собственный набор данных.

При работе в режиме MPMD (*Multiple Program Multiple Data* – множество программ, множество данных) для каждого узла (или потока) создается своя собственная программа. При параллельном выполнении этих программ каждая из них использует собственный набор данных [20, 22].

Режим работы «Резидент – агенты» кластера возможно использовать в случае, когда на управляющем узле кластера («Резиденте») сформированы индивидуальные для каждого рабочего узла программы и данные, которые загружаются при отсутствии в кластере широковещательного режима. Такое явление может наблюдаться в ТСР/IP сети, протоколы которой не допускают широковещание на сетевом уровне. Ситуация улучшается, когда после загрузки программ и данных сразу начинается обработка на рабочем узле кластера, тогда в распределенном кластере устанавливается режим, занимающий промежуточное положение между режимом «Резидент – агенты» и «Собрание 1».

В режиме работы «Собрание 1» кластера индивидуальные данные загружаются последовательно с управляющего узла на рабочие узлы кластера по IP-адресам (которые имелись к моменту начала загрузки у пользователя и были заданы в программе клиента или управляющего узла). Сразу после завершения всех последовательных загрузок управляющий узел кластера, используя протокол ARP (*Address Resolution Protocol*) [36], обеспечивает сопоставление IP- и MAC-адресов для последующей корректной широковещательной передачи данных в кластере, т.е. при наличии MAC-адресов появляется возможность широковещательной параллельной загрузки копий одной и той же рабочей программы, которые (копии) должны затем параллельно обработать данные, загруженные ранее последовательно на каждый узел кластера.

В режиме «Собрание 2» предполагается, что MAC-адреса уже находятся в предварительно созданной временной таблице (кэш-памяти) соответствий IP- и MAC-адресов для ускорения процесса передачи данных [36]. Поэтому для широковещательной загрузки программ и данных в режимах SPMD и «Собрание 2» проблем не возникает.

Для справки: MAC-адрес (от англ. *Media Access Control* – управление доступом к среде передачи) – уникальный идентификатор, присваиваемый каждой единице сетевого оборудования или некоторым их интерфейсам в компьютерных сетях Ethernet и в некоторых других сетях стандартов IEEE 802 [37].

Заключение

На основе проведенного исследования разработок в области функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем показана актуальность выполнения работ в данном направлении, что обусловлено увеличением спроса на доступные высокопроизводительные вычисления, растущим внедрением методов искусственного интеллекта и машинного обучения.

Кластерные системы обладают рядом преимуществ, облегчающих их внедрение в научные исследования и промышленные разработки: кластерные вычисления помогают организациям повысить производительность своих приложений за счет рационального использования ресурсов компьютеров, входящих в кластер.

Внедрение кластеров пониженной стоимости, так называемых кластеров-лоукостеров, позволяет организациям сократить расходы на ИТ-инфраструктуру. Масштабируемость, гибкость модульных аппаратных и программных решений для кластерных вычислений позволяет организациям уменьшать или увеличивать размер кластера в зависимости от изменяющихся потребностей.

Предложен логико-вероятностный подход к созданию моделей определяемой приложениями и программным обеспечением промежуточного уровня *middleware* функциональной архитектуры кластерных вычислительных систем, позволяющий ускорить создание имитационных моделей для ряда важных режимов использования кластера и осуществить переход к логико-алгебраическим формализованным спецификациям на программные приложения.

Построены имитационные логико-вероятностные и логико-алгебраические модели для ряда важных вариантов использования вычислительного кластера, проведены необходимые статистические эксперименты с данными моделями, давшие обоснования к реализациям соответствующим моделям программному обеспечению промежуточного уровня *middleware*.

Список литературы

1. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб. : БХВ-Петербург, 2002. 608 с.
2. Архитектурные аспекты параллелизма. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/4447/983/lecture/14921?Page=3> (дата обращения: 02.03.2025).
3. Хенесси Д. Л., Паттерсон Д. А. Компьютерная архитектура. Количественный подход. 5-е изд. М. : Техносфера, 2016. 936 с.
4. Архитектуры вычислительных систем: кластерные системы. URL: <https://uzor.belturs.ru/arkhitektury-vychislitel-nykh-sistem-klasternyye-sistemy> (дата обращения: 02.03.2025).
5. Вычислительный кластер: его компоненты, виды и примеры реализации. URL: <https://itelon.ru/blog/vychislitelnyy-klaster/?ysclid=maavbfouji850319464> (дата обращения: 02.03.2025).
6. Эффективные кластерные решения. URL: <https://www.ixbt.com/cpu/clustering.shtml?ysclid=maavg9yxkq334655198> (дата обращения: 02.03.2025).
7. Чем распределенная ВС отличается от кластерной? URL: <https://ru.stackoverflow.com/> (дата обращения: 02.03.2025).
8. Петушков Г. В., Сигов А. С. Анализ и выбор структуры многопроцессорной вычислительной системы по критерию быстродействия // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12, № 6. С. 20–25. doi: 10.32362/2500-316X-2024-12-6-20-25
9. Многопроцессорные и многомашинные вычислительные системы. URL: https://intuit.ru/studies/educational_groups/960/courses/460/lecture/10345?page=2&ysclid=maawtf2w8o719310938 (дата обращения: 02.03.2025).
10. Виды кластерных систем. URL: https://vuzlit.com/963152/vidy_klasternyh_sistem (дата обращения: 02.03.2025).
11. Computer cluster. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_cluster (дата обращения: 02.03.2025).
12. Суперкомпьютеры «Яндекса». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Суперкомпьютеры_«Яндекса» (дата обращения: 02.03.2025).
13. Симонов А. С., Жабин И. А., Куштанов Е. Р., Макагон Д. В., Семенов А. С., Щербак А. Н. Высокоскоростная сеть Ангара: архитектура и результаты применения // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 4 (32). С. 46–53.
14. Евреинов Э. В., Хорошевский В. Г. Однородные вычислительные системы. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1978. 319 с.
15. Дмитриев Ю. К., Хорошевский В. Г. Вычислительные системы из мини-ЭВМ / под ред. Э. В. Евреинова. М. : Радио и связь, 1982. 304 с.
16. Хорошевский В. Г. Инженерный анализ функционирования вычислительных машин и систем. М. : Радио и связь, 1987. 254 с.
17. Миренков М. М. Параллельное программирование для многомодульных вычислительных систем. М. : Радио и связь, 1989. 320 с.
18. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 510 с.
19. Feng Liu, Haitao Wu, Xiaochun Lu, Xiyang Liu. Parallel Distributed Acceleration Based on MPI and OpenMP Technology // International Journal of Grid Distribution Computing. 2015. Vol. 8, № 6. P. 171–184.
20. Mittal G., Kesswani N, Goswami K. A Survey of Current Trends in Distributed, Grid and Cloud Computing // International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering (IJASCSE). 2013. Vol. 2, iss. 3. P. 1–6.

21. Kahanwal B., Singh T. P. The Distributed Computing Paradigms: P2P, Grid, Cluster, Cloud, and Jungle // International Journal of Latest Research in Science and Technology. 2012. Vol. 1, iss. 2. P. 183–187.
22. Seinstra F. J., Maassen J., van Nieuwpoort R. V., Drost N. [et al.]. Jungle Computing: Distributed Supercomputing beyond Clusters, Grids, and Clouds / Department of Computer Science, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081A, 1081 HV Amsterdam, The Netherlands, 2010. P. 1–31.
23. Kumar R. Comparison between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization // International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA). 2015. Vol. 3, № 1. P. 42–47.
24. Sterling T., Cwik T., Becker D., Salmon J., Warren M., Nitzberg B. An Assessment of Beowulf-class Computing for NASA Requirements: Initial Findings from the First NASA Workshop on Beowulf-class Clustered Computing // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 1998. P. 1–16. doi: 10.1109/AERO.1998.682207
25. MPI: A Message-Passing Interface Standard. Version 3.1 // Message Passing Interface Forum. 2015. 836 p. URL: <https://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.1/mpi31-report.pdf> (дата обращения: 02.03.2025).
26. Almasi G. S., Bhanot G. V. [et al.]. Early Experience with Scientific Applications on the Blue Gene/L Supercomputer // Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3648. P. 560–570. doi: 10.1007/11549468_63
27. Hamada T., Nitadori K. 190 TFlops astrophysical N-body simulation on a cluster of GPUs // In Proceedings of the 2010 ACM/IEEE International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '10). Washington, DC, 2010. P. 1–9. doi: 10.1109/SC.2010.1
28. Enabling the Modern Data Center – RDMA for the Enterprise. URL: https://www.infinibandta.org/wp-content/uploads/2019/05/IBTA_WhitePaper_May-20-2019.pdf (дата обращения: 02.03.2025).
29. RDMA_over_Converged_Ethernet. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/RDMA_over_Converged_Ethernet (дата обращения: 02.03.2025).
30. Deploying HPC Cluster with Mellanox InfiniBand Interconnect Solutions / Reference Design. Rev 1.3. 2017. 40 p.
31. На пути к созданию отечественного суперкомпьютера субэкзафлопсной производительности. URL: <https://www.ospcon.ru/files/media/Simonov.pdf> (дата обращения: 02.03.2025).
32. Sugon. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sugon> (дата обращения: 02.03.2025).
33. InfiniBand Clustering. Delivering Better Price/Performance than Ethernet. URL: https://network.nvidia.com/pdf/whitepapers/IB_vs_Ethernet_Clustering_WP_100.pdf (дата обращения: 02.03.2025).
34. Список 500 самых мощных компьютеров мира. URL: <https://parallel.ru/computers/top500.list61.html> (дата обращения: 02.03.2025).
35. Anderson D. P. BOINC: A System for Public-Resource Computing and Storage. URL: https://boinc.berkeley.edu/grid_paper_04.pdf (дата обращения: 02.03.2025).
36. Зелов С. Кластерные технологии. URL: <https://compress.ru/article.aspx?id=9958&ysclid=maawhrd9vh678328188> (дата обращения: 02.03.2025).
37. Forouzan B. A. TCP/IP Protocol Suite. McGraw-Hill, 2009. 1024 p.
38. Standard Group MAC Addresses : a Tutorial Guide. URL: <http://standards.ieee.org/regauth/groupmac/tutorial.html> (дата обращения: 02.03.2025).
39. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II. М. : Мир, 1987. 646 с.
40. Ломакина Л. С., Базин А. С., Вигура А. Н., Киселев А. В. Теория и практика структурного тестирования программных систем. Воронеж : Научная книга, 2013. 220 с.
41. Кулагин В. П. Формирование информационных ресурсов на основе параллельных вычислений // Перспективы науки и образования. 2013. № 6. С. 26–31.

42. Котов В. Е. Сети Петри. М. : Наука, 1984. 160 с.
43. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2008. 167 с.
44. Ющенко Е. Л., Цейтлин Г. Е., Грицай В. П., Терзян Т. К. Многоуровневое структурное проектирование программ: Теоретические основы, инструментарий. М. : Финансы и статистика, 1989. 208 с.
45. Волчихин В. И., Зинкин С. А. Логико-алгебраические модели и методы в проектировании функциональной архитектуры распределенных систем хранения и обработки данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 2. С. 3–16.
46. Зинкин С. А. Элементы новой объектно-ориентированной технологии для моделирования и реализации систем и сетей хранения и обработки данных // Информационные технологии. 2008. № 10. С. 20–27.
47. Микроэкономика. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроэкономика> (дата обращения: 02.03.2025).
48. Макроэкономика. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Макроэкономика> (дата обращения: 02.03.2025).
49. Петушков Г. В., Сигов А. С. Техничко-экономический анализ серверов как вычислительных модулей вычислительных систем класса WSC // Russian Technological Journal. 2025. Vol. 13 (1). P. 49–58. doi: 10.32362/2500-316X-2025-13-1-49-58 EDN: JQICRJ
50. Евреинов Э. В., Косарев Ю. Г. Однородные универсальные системы высокой производительности. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение. 1966. 308 с.
51. Байцер Б. Микроанализ производительности вычислительных систем. М. : Радио и связь, 1983. 360 с.
52. Капитонова Ю. В., Кривой С. Л., Летичевский А. А., Луцкий Г. М. Лекции по дискретной математике. СПб. : БХВ-Петербург, 2004. 624 с.
53. Зинкин С. А. Интеллектуализация и интеграция систем и сетей хранения и обработки данных. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 416 с.
54. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М. : ДМК Пресс, 2004. 320 с.

References

1. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallel'nye vychisleniya = Parallel computing*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002:608. (In Russ.)
2. *Arkhitekturnye aspekty parallelizma = Architectural aspects of parallelism*. (In Russ.). Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/4447/983/lecture/14921?Page=3> (accessed 02.03.2025).
3. Khenessi D.L., Patterson D.A. *Komp'yuternaya arkhitektura. Kolichestvennyy podkhod. 5-e izd. = Computer architecture: a quantitative approach: the 5th edition*. Moscow: Tekhnosfera, 2016:936. (In Russ.)
4. *Arkhitektury vychislitel'nykh sistem: klasternye sistemy = Computer system architectures: cluster systems*. (In Russ.). Available at: <https://uzor.belturs.ru/arkhitektury-vychislitel'nykh-sistem-klasternye-sistemy> (accessed 02.03.2025).
5. *Vychislitel'nyy klaster: ego komponenty, vidy i primery realizatsii = Computing cluster: its components, types and implementation examples*. (In Russ.). Available at: <https://itelon.ru/blog/vychislitel'nyy-klaster/?ysclid=maavbfouji850319464> (accessed 02.03.2025).
6. *Effektivnye klasternye resheniya = Effective cluster solutions*. (In Russ.). Available at: <https://www.ixbt.com/cpu/clustering.shtml?ysclid=maavg9yxkq334655198> (accessed 02.03.2025).

7. *Chem raspredelennaya VS otlichaetsya ot klasternoy?* = *How does a distributed computing system differ from a clustered one?* (In Russ.). Available at: <https://ru.stackoverflow.com/> (accessed: 02.03.2025).
8. Petushkov G.V., Sigov A.S. Analysis and selection of the structure of a multiprocessor computing system based on the performance criterion. *Russian Technological Journal*. 2024;12(6):20–25. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2024-12-6-20-25
9. *Mnogoprotsessornye i mnogomashinnye vychislitel'nye sistemy* = *Multiprocessor and multimachine computing systems*. (In Russ.). Available at: https://intuit.ru/studies/educational_groups/960/courses/460/lecture/10345?page=2&yseid=maawtf2w8o719310938 (accessed 02.03.2025).
10. *Vidy klasternykh system* = *Types of cluster systems*. (In Russ.). Available at: https://vuzlit.com/963152/vidy_klasternyh_sistem (accessed 02.03.2025).
11. *Computer cluster*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_cluster (accessed 02.03.2025).
12. *Superkomp'yutery «Yandeksa»* = *Yandex supercomputers*. (In Russ.). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Superkomp'yutery_«Yandeksa» (accessed 02.03.2025).
13. Simonov A.S., Zhabin I.A., Kushtanov E.R., Makagon D.V., Semenov A.S., Shcherbak A.N. High-speed Angara network: architecture and application results. *Voprosy kibernetiki = Cybersecurity issues*. 2019;(4):46–53. (In Russ.)
14. Evreinov E.V., Khoroshevskiy V.G. *Odnorodnye vychislitel'nye sistemy* = *Homogeneous computing systems*. Novo-sibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение. 1978:319. (In Russ.)
15. Dimitriev Yu.K., Khoroshevskiy V.G. *Vychislitel'nye sistemy iz mini-EVM* = *Computing systems from minicomputers*. Moscow: Radio i svyaz', 1982:304. (In Russ.)
16. Khoroshevskiy V.G. *Inzhenernyy analiz funktsionirovaniya vychislitel'nykh mashin i sistem* = *Engineering analysis of the functioning of computers and systems*. Moscow: Radio i svyaz', 1987:254. (In Russ.)
17. Mirenkov M.M. *Parallel'noe programmirovaniye dlya mnogomodul'nykh vychislitel'nykh system* = *Parallel programming for multi-module computing systems*. Moscow: Radio i svyaz', 1989:320. (In Russ.)
18. Khoroshevskiy V.G. *Arkhitektura vychislitel'nykh system* = *Architecture of computing systems*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005:510. (In Russ.)
19. Feng Liu, Haitao Wu, Xiaochun Lu, Xiyang Liu. Parallel Distributed Acceleration Based on MPI and OpenMP Technology. *International Journal of Grid Distribution Computing*. 2015;8(6):171–184.
20. Mittal G., Kesswani N, Goswami K. A Survey of Current Trends in Distributed, Grid and Cloud Computing. *International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering (IJASCSE)*. 2013;2(3):1–6.
21. Kahanwal B., Singh T.P. The Distributed Computing Paradigms: P2P, Grid, Cluster, Cloud, and Jungle. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. 2012;1(2):183–187.
22. Seinstra F.J., Maassen J., van Nieuwpoort R.V., Drost N. et al. *Jungle Computing: Distributed Supercomputing beyond Clusters, Grids, and Clouds*. Department of Computer Science, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1081A, 1081 HV Amsterdam, The Netherlands, 2010:1–31.
23. Kumar R. Comparison between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization. *International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA)*. 2015;3(1):42–47.
24. Sterling T., Cwik T., Becker D., Salmon J., Warren M., Nitzberg B. An Assessment of Beowulf-class Computing for NASA Requirements: Initial Findings from the First NASA Workshop on Beowulf-class Clustered Computing. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 1998:1–16. doi: 10.1109/AERO.1998.682207
25. MPI: A Message-Passing Interface Standard. Version 3.1. *Message Passing Interface Forum*. 2015:836. Available at: <https://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.1/mpi31-report.pdf> (accessed 02.03.2025).

26. Almasi G.S., Bhanot G.V. et al. Early Experience with Scientific Applications on the Blue Gene/L Supercomputer. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005;3648:560–570. doi: 10.1007/11549468_63
27. Hamada T., Nitadori K. 190 TFlops astrophysical N-body simulation on a cluster of GPUs. In *Proceedings of the 2010 ACM/IEEE International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '10)*. Washington, DC, 2010:1–9. doi: 10.1109/SC.2010.1
28. *Enabling the Modern Data Center – RDMA for the Enterprise*. Available at: https://www.infinibandta.org/wp-content/uploads/2019/05/IBTA_WhitePaper_May-20-2019.pdf (accessed 02.03.2025).
29. *RDMA over Converged Ethernet*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/RDMA_over_Converged_Ethernet (accessed 02.03.2025).
30. *Deploying HPC Cluster with Mellanox InfiniBand Interconnect Solutions / Reference Design*. Rev 1.3. 2017:40.
31. *Na puti k sozdaniyu otechestvennogo superkomp'yutera subekzaflopsnoy proizvoditel'nosti = Towards the creation of a domestic supercomputer with sub-exascale performance*. (In Russ.). Available at: <https://www.ospcon.ru/files/media/Simonov.pdf> (accessed 02.03.2025).
32. *Sugon*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sugon> (accessed 02.03.2025).
33. *InfiniBand Clustering. Delivering Better Price/Performance than Ethernet*. Available at: https://network.nvidia.com/pdf/whitepapers/IB_vs_Ethernet_Clustering_WP_100.pdf (accessed 02.03.2025).
34. *Spisok 500 samykh moshchnykh komp'yutеров mira = List of the 500 most powerful computers in the world*. (In Russ.). Available at: <https://parallel.ru/computers/top500.list61.html> (accessed 02.03.2025).
35. Anderson D.P. *BOINC: A System for Public-Resource Computing and Storage*. Available at: https://boinc.berkeley.edu/grid_paper_04.pdf (accessed 02.03.2025).
36. Zelov S. *Klasternye tekhnologii = Cluster technologies*. (In Russ.). Available at: <https://compress.ru/article.aspx?id=9958&ysclid=maawhrd9vh678328188> (accessed 02.03.2025).
37. Forouzan B.A. *TCP/IP Protocol Suite*. McGraw-Hill, 2009:1024.
38. *Standard Group MAC Addresses: a Tutorial Guide*. Available at: <http://standards.ieee.org/regauth/groupmac/tutorial.html> (accessed 02.03.2025).
39. Pritsker A. *Vvedenie v imitatsionnoe modelirovanie i yazyk SLAM II = Introduction to Simulation and the SLAM II Language*. Moscow: Mir, 1987:646. (In Russ.)
40. Lomakina L.S., Bazin A.S., Vigura A.N., Kiselev A.V. *Teoriya i praktika strukturnogo testirovaniya programmnykh system = Theory and practice of structural testing of software systems*. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2013:220. (In Russ.)
41. Kulagin V.P. Formation of information resources based on parallel computing. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Prospects of Science and Education*. 2013;(6):26–31. (In Russ.)
42. Kotov V.E. *Seti Petri = Petri net*. Moscow: Nauka, 1984:160. (In Russ.)
43. Polikarpova N.I., Shalyto A.A. *Avtomatnoe programmirovaniye = Automata-based programming*. Saint Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2008:167. (In Russ.)
44. Yushchenko E.L., Tseytlin G.E., Gritsay V.P., Terzyan T.K. *Mnogourovnevoe strukturnoe proektirovanie programm: Teoreticheskie osnovy, instrumentariy = Multilevel structural design of programs: Theoretical foundations, tools*. Moscow: Finansy i statistika, 1989:208. (In Russ.)
45. Volchikhin V.I., Zinkin S.A. Logical-algebraic models and methods in designing the functional architecture of distributed data storage and processing systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2012;(2):3–16. (In Russ.)

46. Zinkin S.A. Elements of a new object-oriented technology for modeling and implementing data storage and processing systems and networks. *Informatsionnye tekhnologii = Information technology*. 2008;(10):20–27. (In Russ.)
47. *Mikroekonomika* = *Microeconomics*. (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Mikroekonomika> (accessed 02.03.2025).
48. *Makroekonomika* = *Microeconomics*. (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Makroekonomika> (accessed 02.03.2025).
49. Petushkov G.V., Sigov A.S. Technical and economic analysis of servers as computing modules of computing systems of the class WSC. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):49–58. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2025-13-1-49-58 EDN: JQICRJ
50. Evreinov E.V., Kosarev Yu.G. *Odnorodnye universal'nye sistemy vysokoy proizvoditel'nosti = Homogeneous universal high-performance systems*. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение. 1966:308. (In Russ.)
51. Baytser B. *Mikroanaliz proizvoditel'nosti vychislitel'nykh sistem = Microanalysis of computing system performance*. Moscow: Radio i svyaz', 1983:360. (In Russ.)
52. Kapitonova Yu.V., Krivoy S.L., Letichevskiy A.A., Lutskiy G.M. *Lektsii po diskretnoy matematike = Lectures on Discrete Mathematics*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2004:624. (In Russ.)
53. Zinkin S.A. *Intellectualizatsiya i integratsiya sistem i setey khraneniya i obrabotki dannykh = Intellectualization and integration of data storage and processing systems and networks*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:416. (In Russ.)
54. Kudryavtsev E.M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem = GPSS World. Fundamentals of simulation modeling of various systems*. Moscow: DMK Press, 2004:320. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Григорий Валерьевич Петушков

проректор, МИРЭА –
Российский технологический
университет (Россия, г. Москва,
пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: petushkov@mirea.ru

Grigory V. Petushkov

Vice-Rector, MIREA – Russian
Technological University (78 Vernadskogo
avenue, Moscow, Russia)

Александр Сергеевич Сигов

доктор физико-математических наук,
профессор, президент МИРЭА –
Российский технологический
университет, академик Российской
академии наук (Россия, г. Москва,
пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: sigov@mirea.ru

Alexander S. Sigov

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, President, MIREA -
Russian Technological University,
Academician, Russian Academy
of Sciences (78 Vernadskogo avenue,
Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 16.05.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 29.08.2025

Принята к публикации / Accepted 10.09.2025

УДК 004.942

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-4

Методология функционального моделирования как инструмент разработки адекватных математических моделей процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах

Р. А. Хворов¹, К. С. Скрыль², И. И. Корчагин³, К. Е. Амелина⁴

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

^{2,4}Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³АО «Информационная внедренческая компания», Москва, Россия

¹khvoroff@rambler.ru, ²kskryl@bmstu.ru, ³korchagin@ivk.ru, ⁴amelina@bmstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из направлений решения проблемы повышения адекватности математических моделей процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах (КС) является формализация этих процессов с использованием методического аппарата функционального моделирования. *Цель* – разработка процедуры построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах с использованием методического аппарата функционального моделирования. *Результаты.* Обоснована и реализована процедура построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС, включающая: этап детализации целевой функции «Антивирусная защита», этап установления порядка выполнения ее функциональных компонент на каждом из уровней декомпозиции, этап представления модели в виде графов и этап формирования аналитических выражений для оценки временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС. *Выводы.* Достигаемая за счет функциональной декомпозиции целевой функции «Антивирусная защита» адекватность математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС дает возможность научного обоснования требований к направлениям совершенствования соответствующих механизмов защиты.

Ключевые слова: функциональное моделирование, марковский процесс, антивирусная защита, математические модели процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах

Для цитирования: Хворов Р. А., Скрыль К. С., Корчагин И. И., Амелина К. Е. Методология функционального моделирования как инструмент разработки адекватных математических моделей процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 63–73. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-4

Functional modeling methodology as a tool for developing adequate mathematical models of antivirus protection processes in computer systems

R.A. Khvorov¹, K.S. Skryl², I.I. Korchagin³, K.E. Amelina⁴

¹Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Voronezh, Russia

^{2,4}Bauman Moscow State Technical University
(National Research University), Moscow, Russia

³Information Implementation Company JSC, Moscow, Russia

¹khvoroff@rambler.ru, ²kskryl@bmstu.ru, ³korchagin@ivk.ru, ⁴amelina@bmstu.ru

Abstract. *Background.* One of the directions for solving the problem of increasing the adequacy of mathematical models of processes for ensuring anti-virus protection in computer systems (CS) is the formalization of these processes using the methodological apparatus of functional modeling. The purpose of the study is to develop a procedure for constructing mathematical models of the temporal characteristics of processes providing anti-virus protection in computer systems using the methodological apparatus of functional modeling. *Results.* The procedure for constructing mathematical models of the temporal characteristics of the processes of providing anti-virus protection in the CS is substantiated and implemented, including: the stage of detailing the objective function “Anti-virus protection”, the stage of establishing the order of execution of its functional components at each of the decomposition levels, the stage of presenting the model in the form of graphs and the stage of forming analytical expressions for assessing the temporal characteristics of the processes of providing antivirus protection in the CS. *Conclusions.* The adequacy of mathematical models of the time characteristics of the processes of providing anti-virus protection in the CS, achieved through the functional decomposition of the objective function “Anti-virus protection”, makes it possible to scientifically substantiate the requirements for the directions of improvement of the corresponding protection mechanisms.

Keywords: functional modeling, Markov process, antivirus protection, mathematical models of antivirus protection processes in computer systems

For citation: Khvorov R.A., Skryl' K.S., Korchagin I.I., Amelina K.E. Functional modeling methodology as a tool for developing adequate mathematical models of antivirus protection processes in computer systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):63–73. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-4

Введение

Важнейшим фактором достижения корректности решения научных задач в сфере предотвращения угроз воздействия вредоносного программного обеспечения (ВПО) на информацию в компьютерных системах (КС) является высокая адекватность математических моделей, используемых для оценки временных характеристик как самих угроз, так и механизмов антивирусной защиты в этих системах [1]. Именно временные характеристики этих механизмов являются значимым фактором как эффективного обеспечения защиты информации в КС, так и эффективного функционирования КС в целом.

Среди множества существующих подходов к оценке адекватности математических моделей выделяется подход [2, 3], в основу которого положена концепция измерения количества информации, на которой базируется современная теория информации [4]. В основе такого подхода лежит восприятие модели объекта как источника знаний о нем. Естественно полагать, что чем больше информации об объекте генерирует модель, тем она более адекватна. Одним из вариантов реализации этой идеи может служить метрика Хартли [5], дающая возможность определить количество информации об объекте путем оценки числа идентифицируемых состояний, которые принимает данный объект. Соответствующее выражение имеет вид

$$K = \log_2(C), \quad (1)$$

где K – количество информации об объекте, C – число идентифицируемых состояний объекта.

Если предположить в качестве инструмента идентификации состояния объекта его модель, то выражение (1) можно рассматривать как выражение для оценки адекватности такой модели. Из чего следует, что чем большее число состояний исследуемого объекта описывает модель, тем выше ее адекватность.

Отсюда очевидным становится требование обеспечения на этапе формализации исследуемых процессов идентификации как можно большего числа их состояний.

Построение математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в компьютерных системах

Существующая практика исследований в области моделирования, включая моделирование в приложениях теории информационной безопасности [6], дает основание полагать, что в качестве методологического аппарата для реализации данного требования может быть применен аппарат функционального моделирования. С этой целью рассмотрим процесс построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС, базовыми этапами которого являются этапы формализации этих процессов методами функционального моделирования.

На первом этапе процедуры построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС путем детализации целевой функции «Антивирусная защита» образуются уровни ее функциональной декомпозиции. При этом исходя из причинно-следственных отношений предполагается, что детализация данной целевой функции будет соответствовать детализации целевой функции «Воздействие ВПО».

На втором этапе устанавливается порядок реализации (выполнения) функциональных компонент на каждом из уровней декомпозиции рассматриваемой целевой функции. При этом характер взаимосвязей между компонентами определяется эмпирически. Формируемые таким образом функциональные модели процесса антивирусной защиты в операционной среде компьютерной сети описываются терминами функциональных диаграмм [7].

На третьем этапе модели описание механизмов антивирусной защиты, иллюстрируемое функциональными диаграммами, представляется в виде графов, отражающих процесс антивирусной защиты в операционной среде КС как марковский [8].

На четвертом этапе формируются аналитические выражения для оценки временных характеристик отдельных функциональных компонент механизма антивирусной защиты.

В соответствии с первым этапом приведенной выше последовательности разработки адекватных математических моделей процессов обеспечения антивирусной защиты путем детализации соответствующей целевой функции «Антивирусная защита» дадим ее структурное представление. Такое представление является способом отражения специалистами в области компьютерной вирусологии их эмпирических знаний о порядке реализации механизмов антивирусной защиты.

Исходя из динамики достижения целей реализации этих механизмов должностными лицами, ответственными за обеспечение безопасности ин-

формации в КС, необходимо проанализировать источники потенциальной угрозы воздействия ВПО, состояние и поведение операционной среды КС, а также отреагировать на вредоносную активность ВПО [9].

Определим эти действия как функциональные компоненты первого уровня декомпозиции целевой функции «Антивирусная защита» или этапы ее реализации:

- этап анализа источников потенциальной угрозы воздействия ВПО (этап $\mathcal{E}_1^{(3)}$);

- этап анализа состояния операционной среды и ее поведения (этап $\mathcal{E}_2^{(3)}$);

- этап реагирования на вредоносную активность (этап $\mathcal{E}_3^{(3)}$).

Этап $\mathcal{E}_1^{(3)}$ составляют следующие функциональные компоненты процесса анализа источников потенциальной угрозы воздействия ВПО:

- тактика анализа входящих и исходящих сообщений на наличие вредоносных вложений, ссылок, признаков фишинга (тактика $T_{1.1}^{(3)}$);

- тактика анализа доменных имен, IP- и URL-адресов для обнаружения вредоносной активности (тактика $T_{1.2}^{(3)}$);

- тактика анализа сетевого трафика с целью обнаружения признаков вредоносной активности (тактика $T_{1.3}^{(3)}$);

- тактика анализа файлов на наличие вредоносного кода, аномалий и других признаков компрометации (тактика $T_{1.4}^{(3)}$).

Второй этап – этап $\mathcal{E}_2^{(3)}$ – составляют следующие функциональные компоненты процесса анализа состояния операционной среды и ее поведения:

- тактика анализа активных процессов на наличие аномалий, подозрительного поведения и несанкционированной активности (тактика $T_{2.1}^{(3)}$);

- тактика анализа системных компонент (драйверов, библиотек, реестров) на наличие признаков компрометации и вредоносной активности (тактика $T_{2.2}^{(3)}$);

- тактика анализа поведения пользователей в операционной среде КС с целью выявления вредоносной активности (тактика $T_{2.3}^{(3)}$).

Завершающий реализацию целевой функции этап – этап $\mathcal{E}_3^{(3)}$ – составляют следующие функциональные компоненты процесса реагирования на вредоносную активность: тактика реагирования на уровне процесса (тактика $T_{3.1}^{(3)}$) и на уровне данных (тактика $T_{3.2}^{(3)}$).

В отличие от декомпозиции целевой функции «Воздействие ВПО», где уровень тактик, являясь источником признаков реализации вредоносного воздействия, определяет данный уровень как конечный уровень декомпозиции, для механизмов антивирусной защиты наличие или отсутствие признаков реализации этих механизмов не влияет на процесс защиты. Воспользо-

вавшись принципом структурной идентичности и функциональной противоположности целевых функций «Воздействие ВПО» и «Антивирусная защита», уровень тактик определим как конечный уровень декомпозиции для обеих целевых функций.

В соответствии со вторым этапом приведенной выше последовательности построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС путем детализации целевой функции «Антивирусная защита» определим порядок реализации ее функциональных компонент. Для этого воспользуемся методологией функционального моделирования IDEF0 [10], согласно которой рассматриваемые процессы представляются в виде функциональных диаграмм (рис. 1–4).

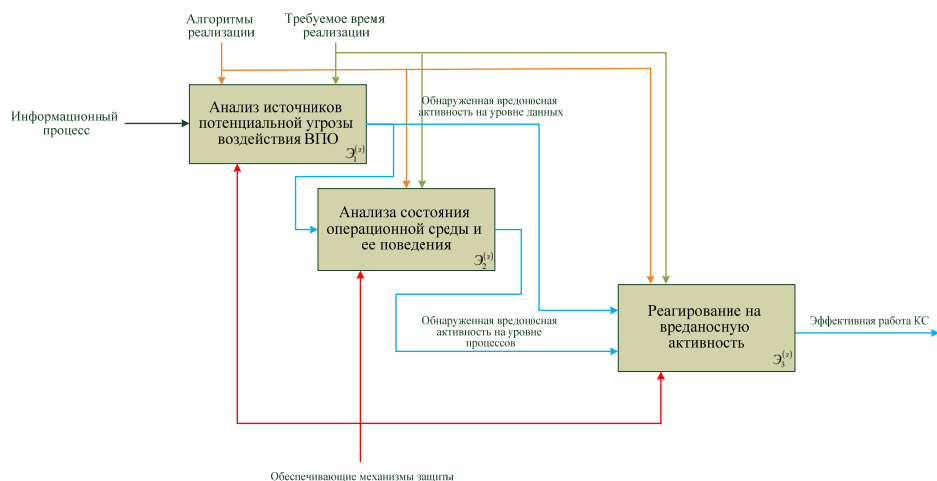


Рис. 1. Функциональная диаграмма целевой функции «Антивирусная защита»

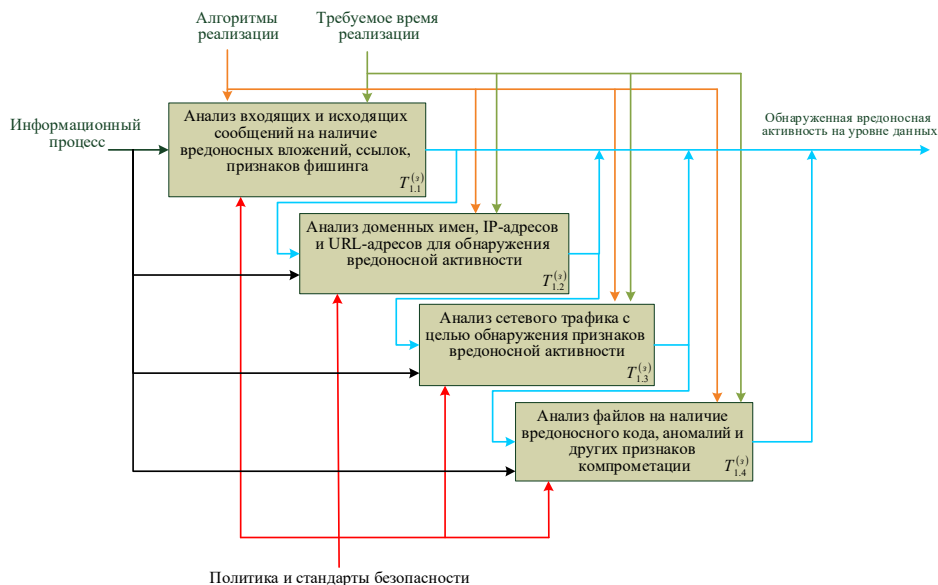


Рис. 2. Функциональная диаграмма этапа $\mathfrak{Z}_1^{(3)}$
анализа источников потенциальной угрозы воздействия ВПО

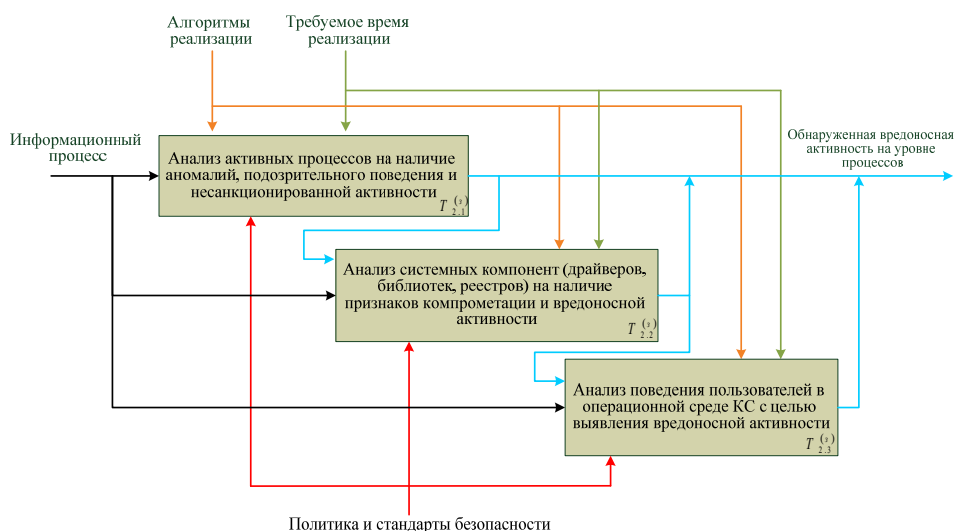


Рис. 3. Функциональная диаграмма этапа $\mathcal{E}_2^{(3)}$
анализа состояния операционной среды и ее поведения

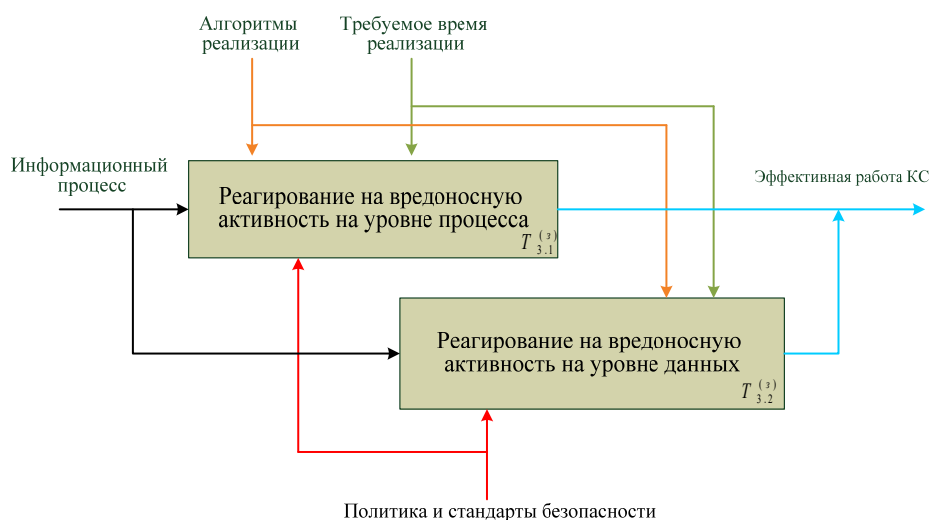


Рис. 4. Функциональная диаграмма этапа $\mathcal{E}_3^{(3)}$
реагирования на вредоносную активность

В соответствии с третьим этапом построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС описание механизмов антивирусной защиты, иллюстрируемое функциональными диаграммами (рис. 1–4), представляется в виде графов, отражающих процесс антивирусной защиты в операционной среде КС как марковский (рис. 5–8).

В соответствии с четвертым этапом построения математических моделей временных характеристик процессов обеспечения антивирусной защиты в КС при их определении воспользуемся функциональными соответствиями между тактиками, применяемыми в рамках отдельных этапов защиты, и меж-

ду этими этапами в процессе реализации целевой функции «Антивирусная защита». Указанные соответствия, а следовательно, и вид аналитической модели для этих характеристик определяются содержанием их композиционных связей.

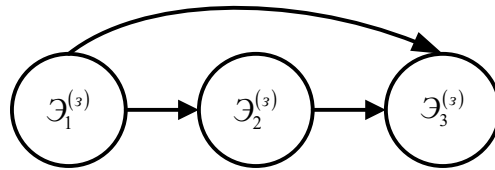


Рис. 5. Представление целевой функции «Антивирусная защита» в виде марковского процесса

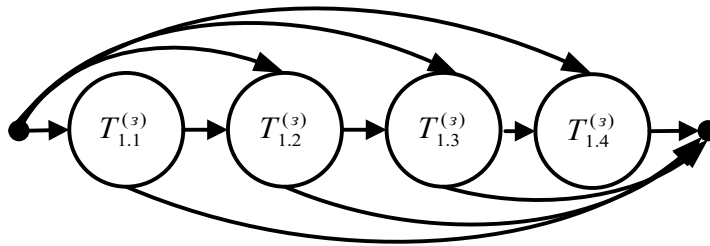


Рис. 6. Представление этапа анализа источников потенциальной угрозы воздействия ВПО в виде марковского процесса

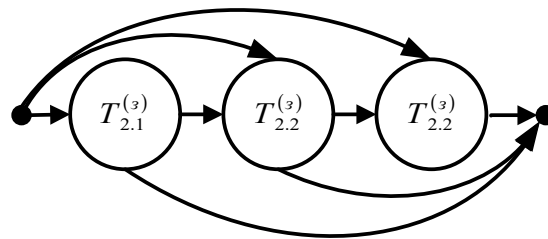


Рис. 7. Представление этапа анализа состояния операционной среды и ее поведения в виде марковского процесса

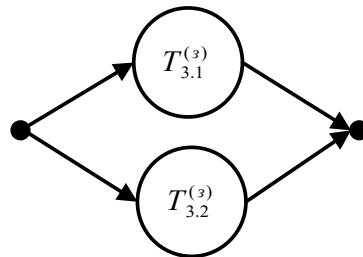


Рис. 8. Представление этапа реагирования на вредоносную активность в виде марковского процесса

При построении аналитических моделей средних значений временных характеристик этапов и самой целевой функции «Антивирусная защита» воспользуемся свойством линейности и аддитивности, математического ожида-

ния композиции случайных величин [11]. При этом для композиции случайных величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$, характеризующих время реализации последовательности функциональных компонент $1, 2, \dots, N$, воспользуемся выражением

$$\bar{\tau} = \sum_{n=1}^N \bar{\tau}_n, \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_n$ – среднее значение случайной величины τ_n .

В случае, когда функциональные компоненты $1, 2, \dots, M$ связаны параллельно, для композиции случайных величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$, характеризующих время их реализации, будем использовать выражение

$$\bar{\tau} = \sum_{m=1}^M p_{s,m} \cdot \bar{\tau}_m, \quad (3)$$

где $p_{s,m}$ и $\bar{\tau}_m$ – вероятность реализации m -й функциональной компоненты после s -й функциональной компоненты и среднее значение случайной величины τ_m времени ее реализации соответственно.

Исходя из приведенного на рис. 6 формализованного представления этапа анализа источников потенциальной угрозы воздействия ВПО среднее значение случайной величины времени $\bar{\tau}_{\Theta_1^{(3)}}$ его выполнения определяется в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{\Theta_1^{(3)}} = & p_{1.1} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{1.1}^{(3)}} + p_{1.1,1.2} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{1.2}^{(3)}} + p_{1.2,1.3} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{1.3}^{(3)}} + p_{1.4} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.4}^{(3)}} \right) \right) \right) + \\ & + p_{1.2} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{1.2}^{(3)}} + p_{1.2,1.3} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{1.3}^{(3)}} + p_{1.4} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.4}^{(3)}} \right) \right) + \\ & + p_{1.3} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{1.3}^{(3)}} + p_{1.4} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.4}^{(3)}} \right) + p_{1.4} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.4}^{(3)}}; \end{aligned} \quad (4)$$

где $\bar{\tau}_{T_{1.m}^{(3)}}$ – среднее значение времени реализации $m, m = 1, 2, \dots, 4$, тактики этапа $\Theta_1^{(3)}$ анализа источников потенциальной угрозы; $p_{1.i}$ – вероятность выполнения i -й тактики этапа $\Theta_1^{(3)}$; $p_{1.i,1.j}$ – вероятность выполнения j -й тактики после завершения i -й тактики этапа $\Theta_1^{(3)}$.

Исходя из приведенного на рис. 7 формализованного представления этапа анализа состояния операционной среды и ее поведения среднее значение случайной величины времени $\bar{\tau}_{\Theta_2^{(3)}}$ его выполнения определяется в соответствии с выражением

$$\bar{\tau}_{\Theta_2^{(3)}} = p_{2.1} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{2.1}^{(3)}} + p_{2.1,2.2} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{2.2}^{(3)}} + p_{2.3} \cdot \bar{\tau}_{T_{2.3}^{(3)}} \right) \right) +$$

$$+ p_{2.2} \cdot \left(\bar{\tau}_{T_{2.2}}^{(3)} + p_{2.3} \cdot \bar{\tau}_{T_{2.3}}^{(3)} \right) + p_{2.3} \cdot \bar{\tau}_{T_{2.3}}^{(3)}, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}_{T_{2.m}}^{(3)}$ – среднее значение времени реализации m , $m = 1, 2, 3$, тактик этапа $\mathcal{E}_2^{(3)}$ анализа состояния операционной среды и ее поведения; $p_{2.i}$ – вероятность выполнения i -й тактики этапа $\mathcal{E}_2^{(3)}$; $p_{2.i,2.j}$ – вероятность выполнения j -й тактики после завершения i -й тактики этапа $\mathcal{E}_2^{(3)}$.

Исходя из приведенного на рис. 8 формализованного представления этапа реагирования на вредоносную активность среднее значение случайной величины времени $\bar{\tau}_{\mathcal{E}_3}^{(3)}$ его выполнения определяется в соответствии с выражением

$$\bar{\tau}_{\mathcal{E}_3}^{(3)} = p_{3.1} \cdot \bar{\tau}_{T_{3.1}}^{(3)} + p_{3.2} \cdot \bar{\tau}_{T_{3.2}}^{(3)}, \quad (6)$$

где $\bar{\tau}_{T_{3.m}}^{(3)}$ – среднее значение времени реализации m , $m = 1, 2$, тактик этапа $\mathcal{E}_3^{(3)}$ нарушения состояния защищенности информации; $p_{3.1}$ и $p_{3.2}$ – вероятность выполнения тактик $T_{3.1}^{(3)}$ и $T_{3.2}^{(3)}$ этапа $\mathcal{E}_3^{(3)}$ соответственно.

Исходя из приведенного на рис. 5 формализованного представления целевой функции «Антивирусная защита» среднее значение случайной величины времени $\bar{\tau}_{(AB3)}$ ее выполнения определяется в соответствии с выражением

$$\bar{\tau}_{(AB3)} = \bar{\tau}_{\mathcal{E}_1}^{(3)} + p_{1.2} \cdot \left(\bar{\tau}_{\mathcal{E}_2}^{(3)} + \bar{\tau}_{\mathcal{E}_3}^{(3)} \right) + p_{1.3} \cdot \bar{\tau}_{\mathcal{E}_3}^{(3)}, \quad (7)$$

где $\bar{\tau}_{\mathcal{E}_1}^{(3)}$, $\bar{\tau}_{\mathcal{E}_2}^{(3)}$ и $\bar{\tau}_{\mathcal{E}_3}^{(3)}$ соответствует выражениям (4), (5) и (6); $p_{1.2}$ и $p_{1.3}$ – вероятность выполнения этапа $\mathcal{E}_2^{(3)}$ после $\mathcal{E}_1^{(3)}$ и этапа $\mathcal{E}_3^{(3)}$ после $\mathcal{E}_1^{(3)}$.

Заключение

Таким образом, очевидно, что обеспечение выполнения высоких требований к адекватности математических моделей антивирусной защиты возможно путем использования методического аппарата функционального моделирования как средства первичной формализации исследуемых процессов. Его применение позволяет формализовать эмпирику исследователя, проявляющуюся вследствие субъективного понимания процесса антивирусной защиты.

Список литературы

1. Касперский Е. В. Компьютерное зловредство. СПб. : Питер, 2007. 208 с.
2. Скрыль С. В., Хохлов Н. С. [и др.]. Информатика : учебник для высших учебных заведений МВД России. Информатика: Концептуальные основы. М. : Маросейка, 2008. Т. 1. 464 с.

3. Сычев А. М., Скряль С. В., Никулин С. С., Пономарёв М. В. [и др.]. Показатели адекватности структурированных систем оценки характеристик информационных процессов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 2. С. 50–53.
4. Куприянов А. И., Коробец Б. Н., Бардаев Э. А., Королев И. Д. [и др.]. Теория информации : учебник / под. ред. С. В. Скряля. М. : Изд. центр «Академия», 2020. 240 с.
5. Хартли Р. Передача информации // Теория информации и ее приложения : сб. переводов. М. : Гос. изд. физ.-мат. лит, 1959. С. 5–35
6. Скряль С. В., Стадник А. Н., Купин Д. С., Домрачев Д. В., Абачараева Э. Р. Функциональное моделирование как инструмент формализации угроз вирусных атак на информационные ресурсы компьютерных систем // Телекоммуникации. 2021. № 4. С. 14–19.
7. Калянов Г. Н. CASE: Структурный системный анализ (автоматизация и применение). М. : Лори, 1996. 242 с.
8. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М. : Сов. радио, 1977. 488 с.
9. Методический документ ФСТЭК России «Методика оценки угроз безопасности информации». Утверждена 5 февраля 2021 года. М. : ФСТЭК, 2021. 83 с.
10. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ. М. : Изд-во стандартов, 2000. 75 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М. : Наука, 1973. 832 с.

Reference

1. Kasperskiy E.V. *Komp'yuternoe zlovredstvo = Computer malware*. Saint Petersburg: Piter, 2007:208. (In Russ.)
2. Skryl' S.V., Khokhlov N.S. et al. *Informatika: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy MVD Rossii. Informatika: Kontseptual'nye osnovy = Computer science: a textbook for Higher Education Institutions of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Computer science: conceptual foundations*. Moscow: Maroseyka, 2008;1:464. (In Russ.)
3. Sychev A.M., Skryl' S.V., Nikulin S.S., Ponomarev M.V. et al. Indicators of the adequacy of structured systems for assessing the characteristics of information processes. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial control systems and controllers*. 2017;(2):50–53. (In Russ.)
4. Kupriyanov A.I., Korobets B.N., Bardaev E.A., Korolev I.D. et al. *Teoriya informatsii: uchebnik = Information theory: a textbook*. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2020:240. (In Russ.)
5. Khartli R. Transfer of information. *Teoriya informatsii i ee prilozheniya: sb. perevodov = Information theory and its applications: a collection of translations*. Moscow: Gos. izd. fiz.-mat. lit, 1959;5–35. (In Russ.)
6. Skryl' S.V., Stadnik A.N., Kupin D.S., Domrachev D.V., Abacharaeva E.R. Functional modeling as a tool for formalizing threats of virus attacks on information resources of computer systems. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2021;(4):14–19. (In Russ.)
7. Kalyanov G.N. *CASE: Strukturnyy sistemnyy analiz (avtomatizatsiya i primeneniye) = CASE: Structural systems analysis (automation and application)*. Moscow: Lori, 1996:242. (In Russ.)
8. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markovskie protsessy = Markov processes*. Moscow: Sov. radio, 1977:488. (In Russ.)
9. *Metodicheskiy dokument FSTEK Rossii «Metodika otsenki ugroz bezopasnosti informatsii». Utverzhdena 5 fevralya 2021 goda = FSTEC of Russia's Methodological Document "Methodology for Assessing Information Security Threats". Approved on February 5, 2021*. Moscow: FSTEK. 2021:83. (In Russ.)

10. *Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya IDEF0. Rukovodyashchiy document = IDEF0 Functional Modeling Methodology. Guidance Document.* Moscow: Izd-vo standartov, 2000:75. (In Russ.)
11. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov) = Handbook of Mathematics (for scientists and engineers).* Moscow: Nauka, 1973:832. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Руслан Александрович Хворов

кандидат технических наук, старший преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Россия, Воронеж, ул. Ст. Большевиков, 54)

E-mail: khvoroff@rambler.ru

Ruslan A. Khvorov

Candidate of engineering sciences, senior lecturer of the Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin” (54 St. Bolshevnikov street, Voronezh, Russia)

Кирилл Сергеевич Скрыль

кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры безопасности в цифровом мире, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)

E-mail: kskryl@bmstu.ru

Kirill S. Skryl'

Candidate of juridical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of Security in the Digital World, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5 Vtoraya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Игорь Игоревич Корчагин

руководитель группы обеспечения безопасности информации, АО «Информационная внедренческая компания» (Россия, г. Москва, ул. Бутырская, 75)

E-mail: korchagin@ivk.ru

Igor' I. Korchagin

Head of the Information Security Group, Information Implementation Company JSC (75 Butyrskaya street, Moscow, Russia)

Ксения Евгеньевна Амалина

кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры безопасности в цифровом мире, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)

E-mail: amelina@bmstu.ru

Kseniya E. Amelina

Candidate of juridical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of Security in the Digital World, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5 Vtoraya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 07.05.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 16.06.2025

Принята к публикации / Accepted 23.08.2025

УДК 004.942

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-5

Функциональная модель этапа доступа к отдельному средству вычислительной техники в процессе вирусной атаки в компьютерных системах

Р. А. Хворов¹, К. С. Скрыль², И. И. Корчагин³,
К. Е. Амелина⁴, В. В. Гайфулин⁵, И. В. Савельев⁶

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

^{2,4}Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³АО «Информационная внедренческая компания», Москва, Россия

^{5,6}Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко, Краснодар, Россия

¹khvoroff@rambler.ru, ²kskryl@bmstu.ru, ³korchagin@ivk.ru,

⁴amelina@bmstu.ru, ⁵gayfulin2007@yandex.ru, ⁶kvvu@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение адекватности математических моделей воздействия вредоносного программного обеспечения (ВПО), используемых для обоснования требований к характеристикам и направлениям совершенствования антивирусных механизмов компьютерных систем (КС), может быть достигнуто использованием методического аппарата функционального моделирования. *Цель* – обоснование методического аппарата для формализации угроз воздействия ВПО с целью построения адекватных математических моделей для оценки временных характеристик такого рода угроз. *Материалы и методы.* Решение задачи построения функциональных моделей в компьютерных системах производится на основе методологии функционального моделирования, системного анализа и теории графов. *Результаты.* Обоснована и реализована процедура построения математических моделей временных характеристик угроз воздействия ВПО, включающая: этап детализации целевой функции «Воздействие ВПО», этап установления порядка выполнения ее функциональных компонент на каждом из уровней декомпозиции, этап формирования пространства признаков воздействия ВПО, этап представления модели в виде графов и этап формирования аналитических выражений для оценки временных характеристик угрозы. *Выводы.* Достижимая за счет функциональной декомпозиции целевой функции «Воздействие ВПО» адекватность математических моделей временных характеристик угроз такого воздействия позволяет обеспечить обоснованность требований к направлениям совершенствования антивирусных механизмов КС.

Ключевые слова: функциональное моделирование, марковский процесс, вредоносное программное обеспечение, математические модели воздействия вредоносного программного обеспечения

Для цитирования: Хворов Р. А., Скрыль К. С., Корчагин И. И., Амелина К. Е., Гайфулин В. В., Савельев И. В. Функциональная модель этапа доступа к отдельному средству вычислительной техники в процессе вирусной атаки в компьютерных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 74–85. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-5

The functional model of stage access to a separate computer hardware in the process of a virus attack in computer systems

R.A. Khvorov¹, K.S. Skryl², I.I. Korchagin³,
K.E. Amelina⁴, V.V. Gayfulin⁵, I.V. Savel'ev⁶

¹Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia

^{2,4}Bauman Moscow State Technical University
(National Research University), Moscow, Russia

³Information Implementation Company JSC, Moscow, Russia

^{5,6}Krasnodar Higher Military School named after General
of the Army S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia

¹khvoroff@rambler.ru, ²kskryl@bmstu.ru, ³korchagin@ivk.ru,

⁴amelina@bmstu.ru, ⁵gayfulin2007@yandex.ru, ⁶kvvu@mil.ru

Abstract. *Background.* Increasing the adequacy of mathematical models of the impact of malicious software (MS), used to substantiate the requirements for the characteristics and directions for improving the anti-virus mechanisms of computer systems (CS), can be achieved by using the methodological apparatus of functional modeling. The purpose of the study is to substantiate a methodological apparatus for formalizing the threats of MS in order to construct adequate mathematical models for assessing the temporal characteristics of such threats. *Materials and methods.* The solution to the problem of constructing functional models in computer systems is based on the methodology of functional modeling, systems analysis and graph theory. *Results.* A procedure for constructing mathematical models of the temporal characteristics of threats of MS has been substantiated and implemented, including: a stage of detailing the objective function "Impact of MS", a stage of establishing the order of execution of its functional components at each level of decomposition, a stage of forming the space of MS features, a stage of presenting the model in the form of graphs and a stage of forming analytical expressions for assessing the temporal characteristics of the threat. *Conclusions.* The adequacy of mathematical models of the temporal characteristics of threats of such impact, achieved through the functional decomposition of the objective function "Impact of MS", allows for the validity of requirements for the directions of improvement of anti-virus mechanisms of the CS.

Keywords: functional modeling, Markov process, malicious software, mathematical models of the impact of malicious software

For citation: Khvorov R.A., Skryl K.S., Korchagin I.I., Amelina K.E., Gayfulin V.V., Savel'ev I.V. The functional model of stage access to a separate computer hardware in the process of a virus attack in computer systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):74–85. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-5

Введение

Характерной особенностью исследований в сфере информационной безопасности является отсутствие возможности проведения натурных экспериментов на функционирующих информационных системах. Это обусловлено наличием рисков неконтролируемого нарушения безопасности информации этих систем и как следствие – существенным ущербом для тех сфер деятельности, в интересах которых данные системы функционируют. Подобного рода обстоятельства приводят к безальтернативному использованию математического моделирования в качестве методологии исследования в данной

сфере. Это в свою очередь порождает довольно серьезную как в теоретическом, так и в практическом плане проблему адекватности применяемых математических моделей.

Устранение данной проблемы применительно к разработке адекватных математических моделей воздействия вредоносного программного обеспечения (ВПО) связано с тем обстоятельством, что модель подобного рода угрозы безопасности информации следует рассматривать как источник информации о ней. Это, в свою очередь позволяет, в соответствии с положениями классической теории информации [1–4], сделать вывод о том, что чем больше состояний угрозы воздействия ВПО будет представлено моделью, тем большее количество информации об угрозе будет получено путем ее моделирования, а, следовательно, такая модель будет более адекватной. С этой целью была предложена четырехэтапная процедура построения математических моделей временных характеристик процессов воздействия ВПО:

- первый этап – структуризация целевой функции «Воздействие ВПО» путем ее декомпозиции на отдельные уровни с последующим определением множества функциональных компонент на каждом уровне;

- второй этап – определение порядка реализации ее функциональных компонент;

- третий этап – формальное представление порядка реализации рассматриваемой целевой функции марковским процессом;

- четвертый этап – построение аналитических выражений для определения временных характеристик отдельных компонент и самой целевой функции «Воздействие ВПО» в целом.

Цель исследования – описать приведенную последовательность для случая построения математических моделей временных характеристик используемых тактик доступа к отдельным средствам вычислительной техники (СВТ) в процессе вирусной атаки как совокупности техник применения тех или иных вирусных механизмов.

Четырехэтапная процедура построения математических моделей временных характеристик процессов воздействия вредоносного программного обеспечения

На первом этапе путем детализации функциональной компоненты «Доступ к отдельному СВТ – объекту вирусной атаки» (этап $\mathcal{E}_1^{(B)}$ реализации целевой функции «Воздействие ВПО») образуются уровни ее функциональной декомпозиции: уровень тактик и уровень техник. Исходя из того, что техники применения тех или иных вирусных механизмов проявляются в операционной среде компьютерной системы (КС) в виде соответствующих признаков, обнаруживаемых и идентифицируемых как средствами контроля и диагностики операционной системы, так и антивирусными средствами, уровень техник является конечным уровнем декомпозиции целевой функции.

На втором этапе устанавливается порядок реализации (выполнения) техник в рамках тактики. При этом характер взаимосвязей между данными функциональными компонентами определяется эмпирически [5]. Формируемые таким образом функциональные модели доступа к отдельным СВТ в процессе вирусной атаки описываются терминами функциональных диаграмм.

На третьем этапе модели в терминах функциональных диаграмм представляются в виде графов, описывающих процесс доступа к отдельным СВТ – объектам вирусной атаки как марковского процесса [6].

На четвертом этапе формируются аналитические выражения для оценки временных характеристик функциональных компонент, реализуемых в процессе доступа к отдельному СВТ в результате вирусной атаки.

Дадим структурное представление первой из функциональных компонент целевой функции «Воздействие ВПО» – этапу доступа к отдельному СВТ в процессе вирусной атаки. В дальнейшем данный этап будем рассматривать как частную целевую функцию, повторив при этом для нее рассмотренную выше четырехэтапную процедуру построения математических моделей временных характеристик процессов воздействия ВПО.

На первом этапе данной процедуры исходя из динамики достижения нарушителем своей цели при реализации частной целевой функции «Доступ к отдельному СВТ в процессе вирусной атаки» нарушителю необходимо осуществить внедрение и инициировать работу вредоносной программы, обеспечить выявление ею уязвимостей базовых компонент программного обеспечения (ПО) путем анализа их работы в операционной среде КС с целью получения высокого уровня доступа в операционной среде и обхода механизма антивирусной защиты путем скрытия своей активности, а также обеспечить постоянный доступ к операционной среде КС путем ассоциирования с программами автозагрузки и связь с контрольным сервером для управления процессами в операционной среде и сбора необходимых данных для доступа к отдельным СВТ в КС [7].

Воспользовавшись терминологией базового документа ФСТЭК [8], регламентирующего порядок проведения исследований с целью оценки угроз безопасности информации, будем считать, что функциональные компоненты данного (первого) уровня декомпозиции, рассматриваемой частной целевой функции, могут быть определены как тактики реализации доступа к отдельным СВТ:

- тактика внедрения ВПО (тактика $T_{1.1}^{(B)}$);
- тактика активации работы вредоносной программы (тактика $T_{1.2}^{(B)}$);
- тактика выявления вредоносной программой уязвимостей базовых компонент ПО, путем анализа их работы в операционной среде КС (тактика $T_{1.3}^{(B)}$);
- тактика получения высокого уровня доступа в операционной среде (тактика $T_{1.4}^{(B)}$);
- тактика обхода механизма резидентной антивирусной защиты путем скрытия активности вредоносных программ (тактика $T_{1.5}^{(B)}$);
- тактика обеспечения постоянного доступа ВПО к операционной среде КС путем ассоциирования с программами автозагрузки (тактика $T_{1.6}^{(B)}$);
- тактика обеспечения связи с контрольным сервером для управления процессами в операционной среде КС и сбора необходимых данных (тактика $T_{1.7}^{(B)}$).

В соответствии с терминологией ФСТЭК [8] будем считать, что функциональные компоненты данного (теперь уже второго) уровня декомпозиции, рассматриваемой частной целевой функции могут быть определены как техники, используемые в процессе реализации отдельных тактик доступа к СВТ.

Рассмотрим процедуру функциональной декомпозиции тактик на примере тактики выявления вредоносной программой уязвимостей базовых компонент ПО путем анализа их работы в операционной среде КС (тактики $T_{1.3}^{(B)}$). Техниками, реализующими данную тактику, являются:

- техника сбора и анализа информации о пользователях, их привилегиях и параметрах учетных записей, а также членства в группах (техника $T_{1.3.1}^{(B)}$);

- техника сбора и анализа информации о правах доступа пользователей к ресурсам (техника $T_{1.3.2}^{(B)}$);

- техника выявления доступных опций и функций программного обеспечения (техника $T_{1.3.3}^{(B)}$);

- техника оценки функциональности компонент ПО (техника $T_{1.3.4}^{(B)}$);

- техника оценки возможностей взаимодействия ВПО с компонентами ПО (техника $T_{1.3.5}^{(B)}$);

- техника анализа активности процессов, выполняемых в операционной среде (техника $T_{1.3.6}^{(B)}$);

- техника оценки наличия и состояния антивирусного ПО и других средств защиты информации (техника $T_{1.3.7}^{(B)}$);

- техника выявления уязвимых приложений (техника $T_{1.3.8}^{(B)}$);

- техника получения списка файлов в файловой системе для выявления конфиденциальной информации (техника $T_{1.3.9}^{(B)}$);

- техника доступа к реестру ОС для извлечения конфигурационных данных и настроек СВТ (техника $T_{1.3.10}^{(B)}$);

- техника получения информации об аппаратных и программных характеристиках СВТ (техника $T_{1.3.11}^{(B)}$);

- техника сбора и анализа информации о сетевых параметрах СВТ (техника $T_{1.3.12}^{(B)}$);

- техника сбора и анализа информации о периферии (техника $T_{1.3.13}^{(B)}$).

Уровень техник является конечным уровнем декомпозиции как частной целевой функции «Доступ к отдельным СВТ – объектам вирусной атаки», так и общей целевой функции «Воздействие ВПО», который позволяет сформировать

ровать признаки воздействия ВПО на операционную среду КС, идентифицируемые соответствующими средствами диагностики ОС и антивирусными средствами. Данные признаки как признаки доступа к отдельным СВТ – объектам вирусной атаки, приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Пространство признаков доступа к отдельным
СВТ – объектам вирусной атаки

Наименование техники	Признак	Средство, идентифицирующее признак
1	2	3
1. Техника сбора и анализа информации о пользователях, их привилегиях и параметрах учетных записей, а также членства в группах	Сбор и анализ информации о пользователях, их привилегиях и параметрах учетных записей, а также членства в группах	PowerView для PowerShell
2. Техника сбора и анализа информации о правах доступа пользователей к ресурсам	Сбор и анализ информации о правах доступа пользователей к ресурсам	AccessEnum от Sysinternals
3. Техника выявления доступных опций и функций программного обеспечения	Выявление доступных опций и функций программного обеспечения	SonarQube; IDA Pro, Ghidra
4. Техника оценки функциональности компонент ПО	Оценка функциональности компонент ПО	Selenium: JUnit/TestNG; Postman; SonarQube: Checkstyle/PMD; Apache JMeter; LoadRunner:
5. Техника оценки возможностей взаимодействия ВПО с компонентами ПО	Оценка возможностей взаимодействия ВПО с компонентами ПО	Postman: SoapUI; Apache JMeter: Cypress: SonarQube; ESLint/TSLint: Elastic Stack (ELK); Prometheus и Grafana
6. Техника анализа активности процессов, выполняемых в операционной среде	Анализ активности процессов, выполняемых в операционной среде	Process Explorer или Sysinternals
7. Техника оценки наличия и состояния антивирусного ПО и других средств защиты информации	Оценка наличия и состояния антивирусного ПО и других средств защиты информации	AV-тест
8. Техника выявления уязвимых приложений	Выявление уязвимых приложений	Nessus; OpenVAS
9. Техника получения списка файлов в файловой системе для выявления конфиденциальной информации	Получение списка файлов в файловой системе для выявления конфиденциальной информации	Командная строка (cmd); PowerShell

Окончание табл. 1

1	2	3
10. Техника доступа к реестру ОС для извлечения конфигурационных данных и настроек СВТ	Доступ к реестру ОС для извлечения конфигурационных данных и настроек СВТ	Regedit или reg query
11. Техника получения информации об аппаратных и программных характеристиках СВТ	Получение информации об аппаратных и программных характеристиках СВТ	CPU-Z; Speccy
12. Техника сбора и анализа информации о сетевых параметрах СВТ	Сбор и анализ информации о сетевых параметрах СВТ	Wireshark
13. Техника сбора и анализа информации о периферии	Сбор и анализ информации о периферии	Диспетчер устройств; PowerShell

В соответствии со вторым этапом приведенной выше последовательности разработки математических моделей определим порядок реализации частной целевой функции «Доступ к отдельным СВТ – объектам вирусной атаки». Для этого воспользуемся методологией функционального моделирования IDEF0 [9], согласно которой рассматриваемые процессы представляются в виде функциональных диаграмм, на рис. 1 приводится порядок реализации, рассмотренной выше в качестве примера, тактики выявления вредоносной программой уязвимостей базовых компонент ПО, путем анализа их работы в операционной среде КС.

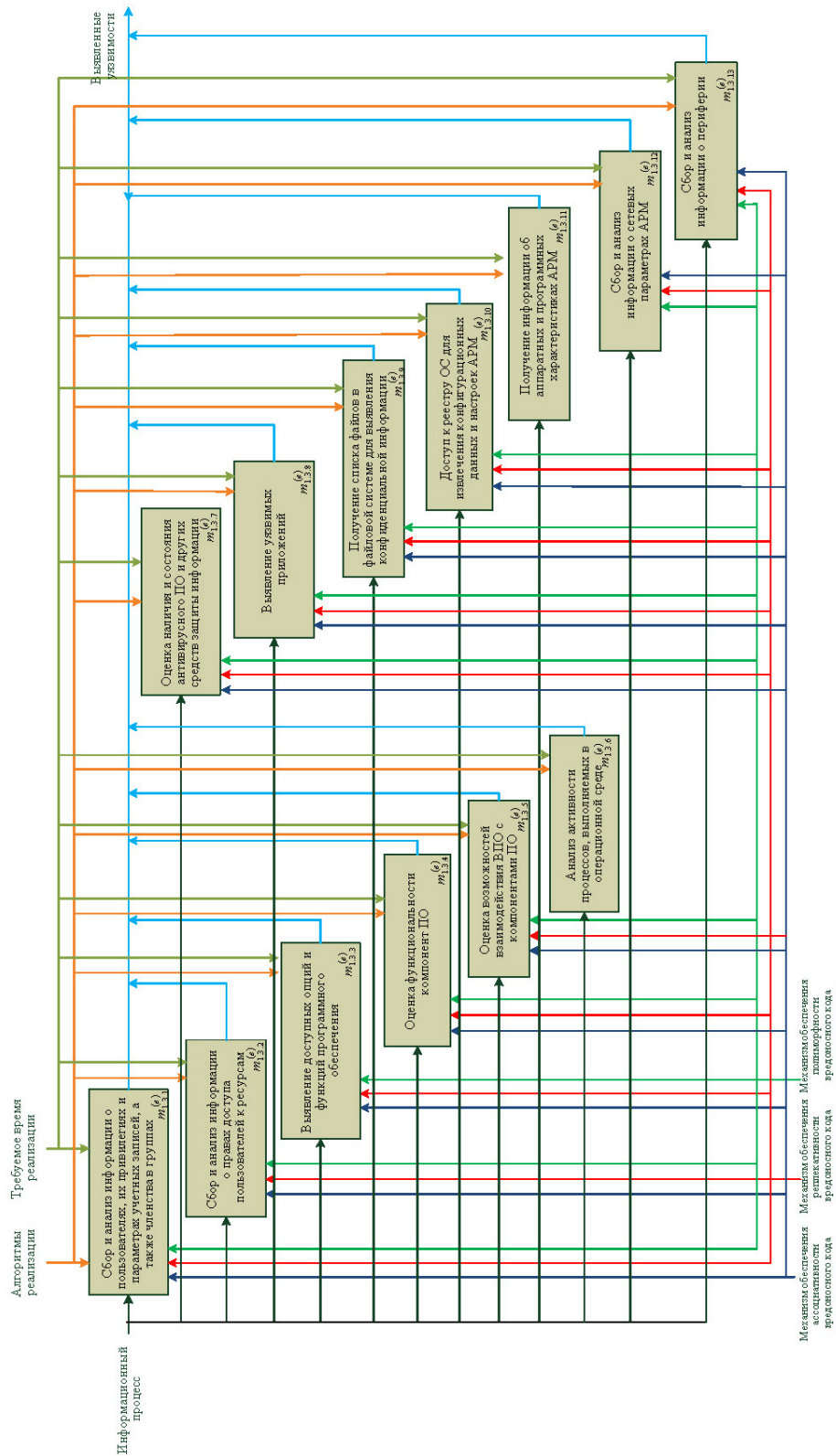
В соответствии с третьим этапом построения модели представим исследуемый процесс, описанный в терминах функциональных диаграмм как марковский. На рис. 2 приводится иллюстрация тактики выявления вредоносной программой уязвимостей базовых компонент ПО как марковского процесса.

В соответствии с четвертым этапом построения модели определяются временные характеристики отдельных функциональных компонент частной целевой функции «Доступ к отдельным СВТ – объектам вирусной атаки». Для этого воспользуемся соответствиями между временными характеристиками функциональных компонент данной целевой функции. Указанные соответствия, а следовательно, и вид аналитических моделей для временных характеристик функциональных компонент определяются содержанием между-уровневых и внутриуровневых композиционных связей.

При построении аналитических моделей средних значений временных характеристик функциональных компонент целевой функции ВПО воспользуемся свойством аддитивности математического ожидания композиции случайных величин [10]. При этом для композиции случайных величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$, характеризующих время реализации последовательности функциональных компонент 1, 2, ..., N , воспользуемся выражением

$$\bar{\tau} = \sum_{n=1}^N \bar{\tau}_n, \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_n$ – среднее значение случайной величины τ_n .

Рис. 1. Функциональная диаграмма тактики T_{1.3}^(b) выявления вредоносных программных уязвимостей базовых компонент ПО

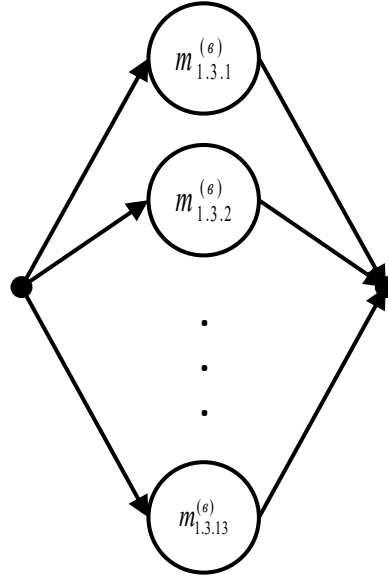


Рис. 2. Представление тактики $T_{1.3}^{(B)}$ выявления вредоносной программой уязвимостей базовых компонент ПО в виде графа

В случае, когда функциональные компоненты $1, 2, \dots, M$, связаны параллельно, для композиции случайных величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$, характеризующих время их реализации, будем использовать выражение

$$\bar{\tau} = \sum_{m=1}^M p_{s,m} \cdot \bar{\tau}_m, \quad (3)$$

где $p_{s,m}$ и $\bar{\tau}_m$ – вероятность реализации m -й функциональной компоненты после s -й функциональной компоненты и среднее значение случайной величины τ_m времени ее реализации соответственно.

Из приведенного на рис. 2 формализованного представления тактики $T_{1.3}^{(B)}$ выявления вредоносной программой уязвимостей базовых компонент ПО следует, что среднее значение случайной величины времени $\bar{\tau}_{T_{1.3}^{(B)}}$ ее выполнения определяется в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{T_{1.3}^{(B)}} = & p_{1.1} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.1}^{(B)}} + p_{1.2} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.2}^{(B)}} + p_{1.3} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.3}^{(B)}} + p_{1.4} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.4}^{(B)}} + p_{1.5} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.5}^{(B)}} + \\ & + p_{1.6} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.6}^{(B)}} + p_{1.7} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.7}^{(B)}} + p_{1.8} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.8}^{(B)}} + p_{1.9} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.9}^{(B)}} + p_{1.10} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.10}^{(B)}} + \\ & + p_{1.11} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.11}^{(B)}} + p_{1.12} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.12}^{(B)}} + p_{1.13} \cdot \bar{\tau}_{T_{1.3.13}^{(B)}}; \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{\tau}_{T_{1.3}^{(B)}}$ – среднее значение времени реализации m -й, $m = 1, 2, \dots, 13$, техники тактики $T_{1.3}^{(B)}$ выявления вредоносной программой уязвимостей базовых

компонент ПО; $p_{1.m}$ – вероятность того, что выполнение тактики $T_{1.3}^{(B)}$ начнется с реализации $T_{1.m}^{(B)}$ m -й, $m = 1, 2, \dots, 13$, техники.

Заключение

Очевидна универсальность четырехэтапной процедуры построения математических моделей для любого варианта функциональной декомпозиции процесса воздействия ВПО. Аналогичным образом могут быть описаны и остальные этапы декомпозиционной структуры целевой функции «Воздействие ВПО».

Принципиальная роль методического аппарата функционального моделирования состоит в том, что он обеспечивает существенное повышение адекватности этих моделей. Его применение позволяет избежать недостатков субъективного мнения экспертов при формировании формализованной картины угрозы воздействия ВПО, так как ориентирует на имеющиеся закономерности практики исследования такого рода угроз в виде последовательности действий нарушителя по реализации своей целевой функции.

Список источников

1. Мазин А. В., Гайфулин В. В. [и др.]. Теория информации как методологическая основа решения проблем адекватной оценки возможностей по обеспечению защиты информации // Известия Института инженерной физики. 2022. № 2 (64). С. 64–68.
2. Скрыль С. В., Хохлов Н. С. [и др.]. Информатика : учебник для высших учебных заведений МВД России. Информатика: Концептуальные основы. М. : Маросейка, 2008. Т. 1. 464 с.
3. Куприянов А. И., Коробец Б. Н., Бардаев Э. А., Королев И. Д. [и др.]. Теория информации: учебник / под. ред. С. В. Скрыля. М. : Изд. центр «Академия», 2020. 240 с.
4. Хартли Р. Передача информации // Теория информации и ее приложения : сб. переводов. М. : Гос. изд. физ.-мат. лит, 1959. С. 5–35.
5. Скрыль С. В., Стадник А. Н., Купин Д. С., Домрачев Д. В., Абачараева Э. Р. Функциональное моделирование как инструмент формализации угроз вирусных атак на информационные ресурсы компьютерных систем // Телекоммуникации. 2021. № 4. С. 14–19.
6. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М. : Сов. радио, 1977. 488 с.
7. Калянов Г. Н. CASE: Структурный системный анализ (автоматизация и применение). М. : Лори, 1996. 242 с.
8. Методический документ ФСТЭК России «Методика оценки угроз безопасности информации». Утверждена 5 февраля 2021 года. М. : ФСТЭК, 2021. 83 с.
9. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ. М. : Изд-во стандартов, 2000. 75 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М. : Изд-во Наука, 1973. 832 с.

Reference

1. Mazin A.V., Gayfulin V.V. et al. Information theory as a methodological basis for solving problems of adequate assessment of capabilities to ensure information security. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki = Proceedings of Institute of Engineering Physics*. 2022;(2):64–68. (In Russ.)

2. Skryl' S.V., Khokhlov N.S. et al. *Informatika: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy MVD Rossii. Informatika: Kontseptual'nye osnovy = Computer science: a textbook for Higher Education Institutions of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Computer science: conceptual foundations*. Moscow: Maroseyka, 2008;1:464. (In Russ.)
3. Kupriyanov A.I., Korobets B.N., Bardaev E.A., Korolev I.D. et al. *Teoriya informatsii: uchebnik = Information theory: a textbook*. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2020:240. (In Russ.)
4. Khartli R. Transfer of information. *Teoriya informatsii i ee prilozheniya: sb. perevodov = Information theory and its applications: a collection of translations*. Moscow: Gos. izd. fiz.-mat. lit, 1959:5–35. (In Russ.)
5. Skryl' S.V., Stadnik A.N., Kupin D.S., Domrachev D.V., Abacharaeva E.R. Functional modeling as a tool for formalizing threats of virus attacks on information resources of computer systems. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2021;(4):14–19. (In Russ.)
6. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markovskie protsessy = Markov processes*. Moscow: Sov. radio, 1977:488. (In Russ.)
7. Kalyanov G.N. *CASE: Strukturnyy sistemnyy analiz (avtomatizatsiya i primeneniye) = CASE: Structural Systems Analysis (Automation and Application)*. Moscow: Lori, 1996:242. (In Russ.)
8. *Metodicheskiy dokument FSTEK Rossii «Metodika otsenki ugroz bezopasnosti informatsii». Utverzhdena 5 fevralya 2021 goda = FSTEC of Russia's Methodological Document "Methodology for Assessing Information Security Threats". Approved on February 5, 2021*. Moscow: FSTEK. 2021:83. (In Russ.)
9. *Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya IDEF0. Rukovodyashchiy document = IDEF0 Functional Modeling Methodology. Guidance Document*. Moscow: Izd-vo standartov, 2000:75. (In Russ.)
10. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov) = Handbook of mathematics (for scientists and engineers)*. Moscow: Izd-vo Nauka, 1973:832. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Руслан Александрович Хворов

кандидат технических наук, старший преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Россия, Воронеж, ул. Ст. Большевиков, 54)

E-mail: khvoroff@rambler.ru

Ruslan A. Khvorov

Candidate of engineering sciences, senior lecturer of the Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin” (54 St. Bolshevikov street, Voronezh, Russia)

Кирилл Сергеевич Скрыль

кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры безопасности в цифровом мире, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)

E-mail: kskryl@bmstu.ru

Kirill S. Skryl'

Candidate of juridical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of Security in the Digital World, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5 Vtoraya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Игорь Игоревич Корчагин

руководитель группы обеспечения безопасности информации, АО «Информационная внедренческая компания» (Россия, г. Москва, ул. Бутырская, 75)

E-mail: korchagin@ivk.ru

Igor' I. Korchagin

Head of the Information Security Group, Information Implementation Company JSC (75 Butyrskaya street, Moscow, Russia)

Ксения Евгеньевна Амелина

кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры безопасности в цифровом мире, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)

E-mail: amelina@bmtu.ru

Kseniya E. Amelina

Candidate of juridical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of Security in the Digital World, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5 Vtoraya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Виктор Валерьевич Гайфулин

кандидат технических наук, доцент кафедры № 34, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко (Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)

E-mail: gayfulin2007@yandex.ru

Viktor V. Gayfulin

Candidate of engineering sciences, associate professor of the sub-department No. 34, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko (4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Игорь Васильевич Савельев

кандидат технических наук, доцент кафедры № 34, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко (Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)

E-mail: kvvu@mil.ru

Igor' V. Savel'ev

Candidate of engineering sciences, associate professor of the sub-department No. 34, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko (4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.06.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 29.08.2025

Принята к публикации / Accepted 12.09.2025

УДК 519.7

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-6

Комбинаторный алгоритм назначения целей

А. В. Данилов¹, П. П. Макарычев²

¹Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

²Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹mail@npp-rubin.ru, ²makpp@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Комбинаторные алгоритмы назначения целей (назначения) находят применение при распределении средств поражения (ресурсов). Основным достоинством комбинаторных алгоритмов локального поиска оптимального назначения целей является невысокая асимптотическая сложность. При этом данные алгоритмы, как правило, не обеспечивают нахождение оптимального решения задачи назначения целей. В связи с этим в работе решаются задачи разработки комбинаторного алгоритма, обеспечивающего оптимальное или субоптимальное решение задачи назначения целей. Цель исследования – обоснование вида глобальной и локальной целевой функции для решения задачи назначения целей, разработка алгоритма локального поиска оптимального назначения целей комбинаторным методом и оценка качества решения задачи. *Материалы и методы.* Разработка комбинаторного алгоритма осуществлена на основе формализованной постановки задачи с использованием матрицы назначений целей. Сумма элементов на главной диагонали матрицы рассматривается как глобальная целевая функция. Минимум суммы элементов находится за счет перестановки столбцов и строк матрицы. Для осуществления очередной перестановки анализируются значения элементов на главной диагонали матрицы, определяется максимальный выигрыш от перестановки. *Результаты.* Определены функции глобального и локального поиска оптимального решения на основе анализа значений элементов на главной диагонали матрицы назначения целей и функции оценки выполнения необходимого и достаточного условий оптимальности. Решена задача назначения целей с использованием разработанного алгоритма. Рассчитаны статистические оценки результативности назначения целей с использованием разработанного алгоритма. *Выводы.* Разработанный комбинаторный алгоритм локального поиска минимума целевой функции назначения целей обеспечивает оптимальное или субоптимальное решение задачи назначения целей. Это подтверждается результатами назначения целей с использованием алгоритма линейного дискретного программирования и алгоритма локального поиска комбинаторным методом. Асимптотика алгоритма не более $O(2n^2)$.

Ключевые слова: комбинаторный алгоритм, алгоритм локального поиска, оптимальность назначения целей, асимптотическая сложность алгоритма

Для цитирования: Данилов А. В., Макарычев П. П. Комбинаторный алгоритм назначения целей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 86–99. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-6

Combinatorial assignment algorithm goals

A.V. Danilov¹, P.P. Makarychev²

¹Research and Production Enterprise “Rubin”, Penza, Russia

²Penza State University, Penza, Russia

© Данилов А. В., Макарычев П. П., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. *Background.* Combinatorial algorithms for assigning targets (assignments) are used in the allocation of means of destruction (resources). The main advantage of combinatorial algorithms for local search for optimal target assignment is low asymptotic complexity. However, these algorithms, as a rule, do not provide an optimal solution to the task of assigning goals. In this regard, the paper solves the problem of developing a combinatorial algorithm that provides an optimal or suboptimal solution to the goal assignment problem. The purpose of the study is to substantiate the type of global and local objective function for solving the purpose assignment problem, develop an algorithm for local search for optimal goal assignment using the combinatorial method, and evaluate the quality of the problem solution. *Materials and methods.* The combinatorial algorithm was developed on the basis of a formalized formulation of the problem using a matrix of goal assignments. The sum of the elements on the main diagonal of the matrix is considered as a global objective function. The minimum sum of the elements is found by rearranging the columns and rows of the matrix. To carry out the next permutation, the values of the elements on the main diagonal of the matrix are analyzed, and the maximum gain from the permutation is determined. *Results.* The functions of global and local search for optimal solutions are defined based on the analysis of the values of the elements on the main diagonal of the goal assignment matrix and the evaluation function for meeting the necessary and sufficient optimality conditions. The goal assignment problem was solved using the developed algorithm. Statistical estimates of the effectiveness of goal assignment are calculated using the developed algorithm. *Conclusions.* The developed combinatorial algorithm for the local search for the minimum of the objective function of goal assignment provides an optimal or suboptimal solution to the goal assignment problem. This is confirmed by the results of goal assignment using a linear discrete programming algorithm and a local search algorithm using the combinatorial method. The asymptotics of the algorithm is no more $O(2n^2)$.

Keywords: combinatorial algorithm, local search algorithm, optimal goal assignment, asymptotic complexity of the algorithm

For citation: Danilov A.V., Makarychev P.P. Combinatorial assignment algorithm goals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):86–99. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-6

Введение

Задача назначения целей может быть решена с использованием различных алгоритмов: линейного дискретного программирования, венгерского метода, метода ветвей и границ, алгоритмов метаэвристики, алгоритмов локального поиска. При этом приближенное решение задачи, полученное в заданное время, более ценно, чем точное решение, найденное после заданного времени. В данной работе предполагается, что элементы матрицы назначений целей определяются значениями мультипликативного критерия [1], например:

$$w_{i,j} = W_i q_{i,j} = W_i (1 - p_{i,j}),$$

где W_i – оценка важности сопровождаемой воздушной цели $C_i, i = \overline{1, n}$, $q_{i,j}$ – вероятность выживания цели при огневом воздействии; $p_{i,j}$ – вероятность поражения цели C_i средством $S_j, j = \overline{1, m}$. В случае решения равновесной задачи назначения: $n = m$, неравновесной задачи: $n \neq m$.

Линейное программирование является одним из наиболее разработанных методов математического программирования, которое успешно применяется в промышленности и сфере обороны. Метод обеспечивает оптимальное решение задачи о назначениях и имеет экспоненциальную асимптотическую сложность $O(2^n)$. Вследствие этого не применяется для решения задач назначения целей. В данной работе метод линейного программирования используется для контроля оптимальности решения задачи о назначениях алгоритмами локального поиска.

Венгерский метод разработан Х. Куном в 1955 г. и относится к дисциплине «Исследование операций». Решение задачи о назначениях этим методом осуществляется за полиномиальное время. Предложенные в 1972 г. модификации алгоритма обеспечивают решение задач о назначениях при асимптотической сложности вычислений $O(n^4)$, $O(n^3)$. Однако обеспечение оптимального решения задачи о назначении целей с использованием модификаций алгоритма находится в зависимости от формализованной постановки и условиях решения задачи [2].

Метод ветвей и границ относится к комбинаторным методам решения задач целочисленного программирования. Впервые метод предложен в 1960 г. для решения нелинейных задач дискретной и комбинаторной оптимизации. Существует множество алгоритмов реализации метода, обеспечивающих оптимальность решения за полиномиальное время. Основной недостаток метода ветвей и границ – необходимость в решении задачи линейного программирования для каждого элемента допустимых решений. При большой размерности задачи назначения целей это влечет значительные затраты времени [3].

Нейросетевой метод реализуется на основе рекуррентной нейронной сети матричной архитектуры и на основе нейронной сети Хопфилда. Решение задачи с помощью данной сети основано на установлении соответствия между функцией вычислительной энергии рекуррентной нейронной сети и целевой функцией [4, 5].

Комбинаторная оптимизация. В алгоритмах этого класса принятие оптимального решения осуществляется на каждом шаге. Алгоритмы используются при решении задач назначения и назначения целей. Решение задач осуществляется путем последовательного анализа локальных оптимальных решений. Поскольку локальное оптимальное решение задачи назначений выявить существенно проще, то асимптотическая сложность жадных алгоритмов, как правило, составляет $O(n^2)$, $O(n^3)$. Вместе с тем оптимальное решение задачи назначения целей достигается не всегда. Имеет место как оптимальное, так и субоптимальное решение. Однако пространство поиска для комбинаторной оптимизации всегда конечно и по заданному условию задачи имеет место оптимальное решение [6–8].

Алгоритмы метаэвристики. Применительно к задачам назначения целей можно выделить три категории метаэвристики: локального поиска (поиск с запретами, имитация отжига) и популяционные (генетические алгоритмы, эволюционные стратегии). Метаэвристики локального поиска определяют стратегии решения задачи назначения целей комбинаторным методом [9].

На основе анализа результативности методов решения задачи о назначении целей можно сделать следующие выводы:

– венгерский алгоритм, метод ветвей и границ имеют асимптотическую сложность не менее $O(n^3)$ при выполнении определенных условий постановки задач;

– комбинаторные алгоритмы характеризуются асимптотической сложностью на уровне $O(2^n)$, но не обеспечивают оптимальное (субоптимальное) решение;

– метод линейного программирования обеспечивает оптимальное решение задачи назначения целей. Однако оценка асимптотической сложности метода не полиномиальная. Можно использовать как средство оценки оптимального решения.

1. Постановка задачи назначения целей

Предположим, что в налете на объект, прикрываемый средствами поражения (СП), принимают участие n воздушных целей. В совокупности СП имеют m работоспособных целевых каналов, обеспечивающих выполнение равенства $n = m$. Предварительное распределение целей задано матрицей U . Строки матрицы соответствуют назначаемым целям, столбцы – целевым каналам СП, имеющим двойную индексацию. Целая часть числа указывает номер СП, дробная часть – номер целевого канала. Значения элементов матрицы формируются датчиком случайных чисел с нормальным законом распределения. Среднее значение элементов матрицы U равно 70, среднеквадратичное отклонение – 11.

Требуется разработать комбинаторный алгоритм локального поиска оптимального (субоптимального) назначения воздушных целей с асимптотической сложностью равной $O(2n^2) \div O(3n^2)$.

Для случая $n = m = 7$ матрица U , вектор столбец C с номерами целей и вектор – строка S с номерами СП и целевых каналов имеют вид

$$U = \begin{pmatrix} 72.8 & 72.8 & 62.0 & 62.0 & 62.0 & 48.2 & 48.2 \\ 82.9 & 82.9 & 69.7 & 69.7 & 69.7 & 74.5 & 74.5 \\ 78.4 & 78.4 & 94.0 & 94.0 & 94.0 & 50.3 & 50.3 \\ 98.9 & 98.9 & 65.8 & 65.8 & 65.8 & 61.2 & 61.2 \\ 71.1 & 71.1 & 20.7 & 20.7 & 20.7 & 76.9 & 76.9 \\ 51.2 & 51.2 & 75.2 & 75.2 & 75.2 & 91.7 & 91.7 \\ 72.4 & 72.4 & 82.6 & 82.6 & 82.6 & 63.2 & 63.2 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{bmatrix}, \quad S^T = \begin{bmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \\ 3.1 \\ 3.2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где элементы вектора столбца C соответствуют номерам целей, в векторе-строке S значения элементов отражают номера СП и целевых каналов. Из выражений (1) видно, что первоначально 1-му каналу заданы цели 1 и 2, 2-му каналу – цели 3, 4, 5, 3-му каналу – цели 6 и 7.

2. Решение задачи методом линейного программирования

Метод дискретного линейного программирования обеспечивает оптимальное решение задач назначения и назначения целей [1]. Недостаток этого

метода при решении задач назначения целей состоит в экспоненциальной асимптотической сложности $O(2^n)$. В данной работе результат назначения целей средствами огневого поражения методом линейного программирования использован в качестве эталона при оценке качества решения задачи с использованием предлагаемого алгоритма метода локального поиска. С использованием инструментальных средств математического пакета Mathcad постановка рассмотренной выше задачи назначения целей может быть осуществлена в виде, представленном на рис. 1.

$$\begin{array}{l}
 j := 1..m \quad i := 1..n \\
 b_i := 1 \quad a_j := 1 \quad X_{n,m} := 0 \\
 F(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{i,j} X_{i,j}) \\
 X \geq 0 \quad X \cdot b \leq a \quad X^T \cdot a = b
 \end{array}$$

Рис. 1. Постановка задачи назначения целей средствами пакета Mathcad:

$F(X)$ – целевая функция, $X_{n,m} = 0$ – начальное значение элементов

матрицы назначений, $X \geq 0$, $X \cdot b \leq a$, $X^T \cdot a = b$ – ограничения, определяемые условиями решения задачи

Оптимальное (минимальное) значение целевой функции достижимо при следующих значениях элементов матрицы X :

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Полученное решение задачи назначения целей может быть представлено квадратной матрицей $W_1 = U \cdot X$, в которой результаты назначения целей представлены на главной диагонали:

$$W_1 = \begin{pmatrix} 48.2 & 62.0 & 48.2 & 62.0 & 62.0 & 72.8 & 72.8 \\ 74.5 & 69.7 & 74.5 & 69.7 & 69.7 & 82.9 & 82.9 \\ 50.3 & 94.0 & 50.3 & 94.0 & 94.0 & 78.4 & 78.4 \\ 61.2 & 65.8 & 61.2 & 65.8 & 65.8 & 98.9 & 98.9 \\ 76.9 & 20.7 & 76.9 & 20.7 & 20.7 & 71.1 & 71.1 \\ 91.7 & 75.2 & 91.7 & 75.2 & 75.2 & 51.2 & 51.2 \\ 63.2 & 82.6 & 51.2 & 82.6 & 82.6 & 72.4 & 72.4 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 3.1 \\ 3.2 \\ 2.1 \\ 2.2 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 2.3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из выражений (2) видно, что решение задачи поиска минимума целевой функции может быть выполнено только за счет перестановок столбцов матрицы U . Перестановка строк при этом не осуществляется. Целевая функция решения задачи имеет следующее значение:

$$F(U) = \sum_{i=1}^n W_{i,i} = 378,3.$$

Аналогично поиск минимума целевой функции может быть осуществлен только за счет перестановки строк $W_2 = X \times U$:

$$W_2 = \begin{pmatrix} 72.4 & 72.4 & 82.6 & 82.6 & 82.6 & 63.2 & 63.2 \\ 51.2 & 51.2 & 75.2 & 75.2 & 75.2 & 91.7 & 91.7 \\ 98.9 & 98.9 & 65.8 & 65.8 & 65.8 & 61.2 & 61.2 \\ 71.1 & 71.1 & 20.7 & 20.7 & 20.7 & 76.9 & 76.9 \\ 82.9 & 82.9 & 69.7 & 69.7 & 69.7 & 74.5 & 74.5 \\ 72.8 & 72.8 & 62.0 & 62.0 & 62.0 & 48.2 & 48.2 \\ 78.4 & 78.4 & 94.0 & 94.0 & 94.0 & 50.3 & 50.3 \end{pmatrix}, S^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix}, X \times C = \begin{bmatrix} 2 \\ 5 \\ 7 \\ 1 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При этом значение суммы элементов на главной диагонали W_2 не меняется и равно 378,3. Таким образом, осуществить решение задачи назначения целей можно с использованием алгоритмов, реализуемых на основе операций перестановки столбцов, перестановки строк, а также перестановки столбцов и строк матрицы U .

3. Решение несбалансированных задач

Предположим, что сопровождается 6 целей. При этом цель 6 не отвечает требованиям по высоте, скорости или курсовому параметру для первого, второго и третьего средств поражения. Отсутствующая цель 7 отражена в матрице U за счет присвоения важности цели значения 200. При этом матрица начального назначения целей U имеет вид

$$U = \begin{bmatrix} 72.8 & 72.8 & 62.0 & 62.0 & 62.0 & 48.2 & 42.8 \\ 82.9 & 82.9 & 69.7 & 69.7 & 69.7 & 74.5 & 74.5 \\ 78.4 & 78.4 & 94.0 & 94.0 & 94.0 & 50.3 & 50.3 \\ 98.9 & 98.9 & 65.8 & 65.8 & 65.8 & 61.2 & 61.2 \\ 71.1 & 71.1 & 20.7 & 20.7 & 20.7 & 76.9 & 76.9 \\ 200.0 & 200.0 & 75.2 & 75.2 & 75.2 & 200.0 & 200.0 \\ 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Таким образом, в U отсутствие цели 7 и несоответствие цели C_6 требованиям по высоте и/или скорости для средств поражения отмечено значением степени важности равной 200. В результате решения на основе перестановки строк в матрице U имеем

$$\mathbf{W}_2 = \begin{pmatrix} 82.9 & 82.9 & 69.7 & 69.7 & 69.7 & 74.5 & 74.5 \\ 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 & 200.0 \\ 71.1 & 71.1 & 20.7 & 20.7 & 20.7 & 76.9 & 76.9 \\ 200.0 & 200.0 & 75.2 & 75.2 & 75.2 & 200.0 & 200.0 \\ 98.9 & 98.9 & 65.8 & 65.8 & 65.8 & 61.2 & 61.2 \\ 72.8 & 72.8 & 62.0 & 62.0 & 62.0 & 48.2 & 48.2 \\ 78.4 & 78.4 & 94.0 & 94.0 & 94.0 & 50.3 & 50.3 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что процедура назначения целей выполнена для семи целей. Результаты назначения размещения – на главной диагонали матрицы $\mathbf{W}_2$. Цель C_6 назначена средству поражения S_2 .

4. Алгоритм проверки оптимальности решения

Линейное дискретное программирование определяет оптимальное решение. Рассмотрим условия выполнения необходимого и достаточного условий оптимальности. Необходимое условие оптимальности: сумма элементов на главной диагонали матрицы назначений, умноженная на $(n - 1)$, должна быть меньше суммы элементов вне диагонали:

$$\forall i \forall j (a_{i,j} \in A) \rightarrow \left((n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{i,j} (i=j) \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{i,j} (i \neq j) \right).$$

Необходимое условие не гарантирует оптимальность решения задачи назначения целей. Оценка достаточного условия оптимальности решения задачи произведена с использованием следующего выражения:

$$\forall i \forall j (a_{i,j} \in A) (i \neq j) \rightarrow (a_{i,i} + a_{j,j}) \leq (a_{i,j} + a_{j,i}). \quad (6)$$

Таким образом, глобальное значение целевой функции – сумма элементов матрицы $\mathbf{W}$ на главной диагонали. Локальное значение целевой функции – значение элемента на главной диагонали. Листинг оценки выполнения достаточного условия приведен на рис. 2.

В результате выполнения программы $PR(W, N)$ получены следующие значения:

$$Q_1 = PR(W, N)_1 = 0, Q_2 = PR(W, N)_2 = 42,$$

$$Q_{\max} = N(N-1) = 42,$$

где Q_1 – количество нарушений достаточного условия оптимальности; Q_2 – количество выполнений достаточного условия оптимальности; $Q_{\max}$ – максимально возможное выполнение достаточного условия оптимальности:

$$Q_1 + Q_2 = Q_{\max}.$$

Если $Q_2 = Q_{\max}$, то имеет место выполнение достаточного условия оптимального назначения целей X .

```

PR(W,N) =
  for k ∈ 1,2.. N
    C1 ← 0, C2 ← 0
    for j ∈ 1,2.. N
      for i ∈ 1,2.. N
        if i ≠ j
          a ← (Wi,j + Wj,i) - (Wi,i + Wj,j)
          C1 ← C1 + 1 if a < 0
          C2 ← C2 + 1 if a ≥ 0
      (C1)
      (C2)

```

Рис. 2. Листинг программы оценки выполнения

5. Решение задачи методом локального поиска

Для повышения эффективности алгоритма локального поиска можно использовать подход на основе метаэвристики. На рис. 3 приведен фрагмент программы реализации алгоритма в среде математического пакета Mathcad. Реализация алгоритма осуществляется по вводу матрицы U . С использованием операторов $n = \text{rows}(U)$ и $m = \text{cols}(U)$ определяется размерность матрицы и задаются начальные нулевые значения счетчиков перестановок строк $K1$ и столбцов $K2$ матрицы.

```

PrA(U) :=
  n ← rows(U), m ← cols(U)
  K1 ← 0
  for i ∈ 1,2.. n
    for j ∈ 1,2.. m
      Ai,j ← Ui,i + Uj,j, Bi,j ← Uj,i + Ui,j
      Cj ← Ai,j - Bi,j
      Di ← max(C), k ← match(Di, C)1

```

Рис. 3. Фрагмент 1 программы назначения целей

Задаются внешний и внутренний циклы для обращения к элементам матрицы U . Анализ начинается с элемента $u_{1,1}$, расположенного в верхнем левом углу матрицы. Так как при $i = j$ сумма элементов $A_{i,j}$ всегда равна сумме элементов $B_{i,j}$, то разность сумм $C_j = 0$. Разность сумм, имеющая положительное значение, отражает возможность понижения значений глобальной и локальной целевой функции.

Значения элементов вектора столбца C_j определяют возможность коррекции глобальной и локальной целевой функции. Если $C_j > 0$, то это указывает на то, что локальное f_j и глобальное $F = F(U) = \sum_{j=1}^n f_j$ значения целевой функции могут быть скорректированы. Для задачи назначения целей требуется максимальное понижение значения как локальной, так и глобальной целевой функции. Определяется максимальное значение:

$$D_i = \max(C_j, j = \overline{1, n}).$$

На рис. 4 приведены значения вектора C при различных значениях индекса i . На рис. 4, а видно, что $c_1 = 0$. Другие элементы имеют отрицательное или положительное значение. Отрицательные значения элементов C_3, C_8, C_9, C_{10} указывают на то, что перестановка строк (столбцов) не приведет к снижению значения глобальной целевой функции $F(U)$.

$C =$		1	$C =$		1	$C =$		1	$C =$		1
	1	0.0		1	0.0		1	-102.1		1	-59.2
	2	6.2		2	-71.4		2	-61.0		2	-79.3
	3	-9.1		3	-60.4		3	-54.7		3	-57.7
	4	39.9		4	-67.2		4	-82.6		4	-37.3
	5	28.2		5	-136.2		5	0.0		5	-40.5
	6	16.3		6	-46.0		6	-18.8		6	-25.4
	7	20.5		7	-47.5		7	-8.4		7	-84.7
	8	-45.4		8	-78.7		8	-65.4		8	-75.0
	9	-4.0		9	-79.0		9	-18.9		9	-62.9
	10	-24.5		10	-16.1		10	-44.0		10	-8.3
	11	0.3		11	-49.4		11	-16.6		11	0.0
	а)			б)			в)			г)	

Рис. 4. Значение вектора C : а – при $i = 1$ и $j = 0$; б – при $i = 1, j = 1, \dots, 11$; в – $i = 5, j = 1, \dots, 11$; г – $i = 5, j = 1, \dots, 11$

Положительные значения элементов $C_2, C_4, C_5, C_6, C_7, C_{11}$ отражают возможность снижения значений локальной и глобальной целевой функции. Элемент C_4 имеет наибольшее значение 39,9. Это значение присваивается параметру D_i и определяется значение индекса элемента:

$$k = \text{match}(D, C) = 4.$$

Параметры D_i, k являются основой реализации цикла $\text{while } D > 0$. Фрагмент программы, содержащий цикл $\text{while } D > 0$, приведен на рис. 5.

В цикле последовательно с использованием операторов $\text{if}()$ анализируются условия выполнения перестановки столбцов и строк. При выполнении

нии условий с применением операторов $for \in 1, 2, \dots, m$, $for \in 1, 2, \dots, n$ реализуются перестановки столбцов или строк.

```

    Di ← max(C), k ← match(Di, C)1
    while Di > 0
        if Uk,i ≥ Ui,k
            "перестановка столбцов"
            for q ∈ 1..n
                Xq ← Uq,i, Uq,i ← Uq,k, Uq,k ← Xq
                K1 ← K1 + 1
            if Uk,i < Ui,k
                "перестановка строк"
                for q ∈ 1..m
                    Yq ← Ui,q, Ui,q ← Uk,q, Uk,q ← Yq
                    K1 ← K1 + 1
                for j ∈ 1, 2..m
                    Ai,j ← Ui,i + Uj,j, Bi,j ← Uj,i + Ui,j
                    Cj ← Ai,j - Bi,j
                Di ← max(C), k ← match(Di, C)1
            Di
        U
    U

```

Рис. 5. Фрагмент 2 программы назначения целей

После перестановки столбцов (строк) осуществляется обновление параметров D_i , k в цикле и процесс коррекции значений целевых функций продолжается. При значении параметра $D_i \leq 0$ выполнение операций в цикле прекращается. Результаты выполнения цикла при $i=1$ приведены на рис. 4,б. Из рис. 4 видно, что все значения $C_j, j=2, 3, \dots, 11$, отрицательные и дальнейшее снижение значения глобальной целевой функции при значении $i=1$ невозможно. Выполняется выход из цикла $while D_i > 0$. Во внешнем цикле $for i \in 1, 2, \dots, n$ производится назначение $i=2$. На рис. 4,в приведены результаты анализа выполнения перестановок столбцов и строк при значении $k=5$. Видно, что по результатам перестановок все оценки отрицательные. На рис. 2,д приведены результаты перестановок при $k=11$.

6. Исследование алгоритма локального поиска

Результаты вычислительного эксперимента с разработанным алгоритмом решения задачи назначения целей методом локального поиска приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

№ п/п	F_1	F_2	К	$\frac{(F_2 - F_1)}{F_1} \%$	F_1	F_2	К	$\frac{(F_2 - F_1)}{F_1} \%$
1	577,3	588,1	264	0,1	557,2	564,7	286	1,3
2	614,1	637,7	154	3,7	539,2	540,1	198	0,2
3	622,0	622,0	143	0,0	523,3	543,4	132	3,7
4	580,7	586,8	242	1,0	581,5	532,8	220	2,7
5	591,1	591,1	99	0,0	550,1	550,1	231	0,0
6	605,3	610,6	176	0,9	482,9	493,1	132	2,1
7	632,8	641,6	176	1,4	529,8	564,1	176	6,1
8	632,4	644,4	198	1,9	547,2	550,6	198	0,6
9	652,1	654,4	242	0,4	547,5	555,3	275	1,4
10	581,6	91,7	253	1,7	434,1	434,1	187	0,0
11	592,8	603,4	88	1,8	508,1	528,8	209	3,9
12	619,1	620,0	154	0,2	514,0	514,0	198	0,0
13	615,1	649,6	121	5,3	506,8	530,8	209	4,5
$\mu = 70, \beta = 11$				Среднее 1,5 %	$\mu = 70, \beta = 17$			Среднее 2,0 %

В эксперименте задание значения мультипликативного критерия оценки остаточной важности цели осуществлено с использованием генератора случайных чисел, имеющих нормальное распределение со средним $\mu = 70$ и средним квадратичным отклонением $\beta = 11$, $\beta = 17$.

В табл. 1 приведены: F_1 – значение целевой функции, найденное методом линейного программирования; F_2 – значение целевой функции, найденное с использованием разработанного алгоритма комбинаторного метода; $(F_1 - F_2)/F_1$ – отклонение решения методом локального поиска от оптимального. Из табл. 1 следует, что при входных данных с нормальным законом распределения во всех 13 вариантах численного эксперимента имело место оптимальное и субоптимальное решение задачи назначения целей с использованием алгоритма локального поиска.

Из рис. 6 видно, что интервал возможных вариантов назначения 13 целей [29,8 114,4]. Возможное число назначений составляет 269. После решения задачи назначения интервал имеет значение [29,8 70,9]. Таким образом, интервал назначений, сформированный с использованием обсуждаемого алгоритма для 13 целей в 2,05 меньше интервала всех возможных 269 назначений. Это соотношение выполняется при значениях среднеквадратичного отклонения $\beta = 11$ и $\beta = 17$.

При решении задачи необходимо в первом цикле выбрать каждый элемент на диагонали матрицы назначений. Во втором цикле анализируется це-

левая функция. Общее количество циклов $n \cdot (n-1) \approx n^2$. Таким образом, при увеличении воздушных целей в 2 раза количество циклов увеличится в 4 раза. Следовательно, асимптотическая сложность рассмотренного выше алгоритма составляет $N \cdot n^2$. В экспериментах $1 < N < 2$.

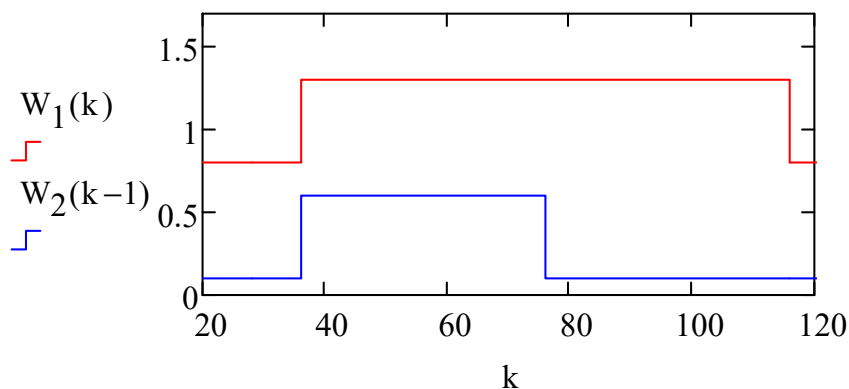


Рис. 6. Интервалы распределения важности целей

Заключение

Алгоритм локального поиска минимума целевой функции при назначении целей в виде суммы элементов на главной диагонали матрицы, разработанный авторами, обеспечивает оптимальное и субоптимальное решение задачи назначения целей. Это подтверждается сравнением результатов назначения целей с использованием алгоритма линейного дискретного программирования и алгоритмом метода локального поиска. Асимптотика алгоритма не более $O(2n^2)$. Алгоритм обеспечивает оптимальное и субоптимальное решение задачи о назначении целей. Среднее значение отклонения целевой функции от оптимального значения при среднем значении $\mu = 70$ и среднеквадратичном отклонении $\beta = 17$ важности цели составляет 1,5 %. Алгоритм может быть использован для решения сбалансированных и несбалансированных задач назначения целей.

Список литературы

1. Липлянин А. Ю., Шеин А. С., Хижняк А. В. Методика учета важности цели при решении задачи распределения летательных аппаратов между огневыми средствами // Доклады БГУИР. Беларусь, 2017. № 2 (104). С. 77–83.
2. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem // Naval Research Logistics (NRL). 2005. Vol. 52 (1). P. 7–21.
3. Перевозчиков А. Г., Решетов В. Ю., Яночкин И. Е. Обобщенные функции целевого распределения и их вычисление методом ветвей и границ // Прикладная математика и информатика. Серия: Труды факультета ВМК МГУ имени В. М. Ломоносова. М., 2021. Т. 66. С. 89–103.
4. Жук А. А., Булойчик В. М. Нейросетевой метод решения нелинейной задачи оптимального распределения неоднородного ресурса // Военная академия Республики Беларусь. Системный анализ и прикладная информатика. 2021. № 1. С. 45–52.

5. Барский А. Б., Мельник Д. М. Нейросетевая модель целераспределения для вычислительной системы архитектуры data flow // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 7. С. 441–448.
6. Корте Б., Фиген Й. Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы / пер. с англ. М. А. Бабенко. М. : МЦНМО, 2015. 720 с.
7. Костенко В. А. Алгоритмы комбинаторной оптимизации, сочетающие жадные стратегии и ограниченный перебор // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 2. С. 48–56.
8. Макарычев П. П. Решение задач назначения целей с использованием тензорной методологии // APSSE 2019. Актуальные проблемы системной и программной инженерии : материалы 6-й Междунар. конф. (Москва, 12–14 ноября). М., 2019. С. 45–55.
9. Щербина О. А. Метаэвристические алгоритмы для задач комбинаторной оптимизации (обзор) // Таврический вестник информатики и математики. 2014. № 1 (24). С. 56–72.

References

1. Liplyanin A.Yu., Shein A.S., Khizhnyak A.V. Methodology for taking into account the importance of a target when solving the problem of distributing aircraft between fire weapons. *Doklady BGUIR = BSUIR Reports. Belarus'*, 2017;(2):77–83. (In Russ.)
2. Kuhn H.W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2005;52(1):7–21.
3. Perevozchikov A.G., Reshetov V.Yu., Yanochkin I.E. Generalized target distribution functions and their calculation using the branch and bound method. *Prikladnaya matematika i informatika. Ser.: Trudy fakul'teta VMK MGU imeni V.M. Lomonosova = Applied Mathematics and Computer Science. Series: Proceedings of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University*. Moscow, 2021;66:89–103. (In Russ.)
4. Zhuk A.A., Buloychik V.M. Neural network method for solving a nonlinear problem of optimal distribution of a heterogeneous resource. *Voennaya akademiya Respubliki Belarus'. Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika = Military Academy of the Republic of Belarus. Systems analysis and applied informatics*. 2021;(1):45–52. (In Russ.)
5. Barskiy A.B., Mel'nik D.M. Neural network model of target distribution for a computing system with data flow architecture. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technology*. 2019;25(7):441–448. (In Russ.)
6. Korte B., Figen Y. *Kombinatornaya optimizatsiya. Teoriya i algoritmy = Combinatorial optimization. Theory and algorithms*. Transl. from Eng. by M.A. Babenko. Moscow: MTsNMO, 2015:720. (In Russ.)
7. Kostenko V.A. Combinatorial optimization algorithms combining greedy strategies and bounded enumeration. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedibgs of the Russian Academy of Sciences. Control theory and systems*. 2017;(2):48–56. (In Russ.)
8. Makarychev P.P. Solving target assignment problems using tensor methodology. *APSSE 2019. Aktual'nye problemy sistemnoy i programnoy inzhenerii: materialy 6-y Mezhdunar. konf. (Moskva, 12–14 noyabrya) = APSSE 2019. Current issues in systems and software engineering: proceedings of the 6th International conference (November 12–14, Moscow)*. 2019:45–55. (In Russ.)
9. Shcherbina O.A. Metaheuristic algorithms for combinatorial optimization problems (review). *Tavrisheskiy vestnik informatiki i matematiki = Tavrichesky Bulletin of Informatics and Mathematics*. 2014;(1):56–72. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Викторович Данилов

генеральный директор Научно-производственного предприятия «Рубин» (Россия, Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: mail@npp-rubin.ru

Aleksey V. Danilov

General Director of Research and Production Enterprise “Rubin” (2 Baydukova street, Penza, Russia)

Петр Петрович Макарычев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: makpp@yandex.ru

Petr P. Makarychev

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of mathematical support for computer applications, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.08.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.09.2025

Принята к публикации / Accepted 24.09.2025

УДК 519.876.5

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-7

**Математическая модель определения
оптимальных условий функционирования комплекса
дистанционного энергетического обеспечения
пространственно распределенных групп воздушных объектов**

А. А. Чепига

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

andreychepiga@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является комплекс дистанционного энергетического обеспечения (КДЭО) пространственно распределенных групп воздушных объектов. Предметом исследования являются параметры функционирования КДЭО и их влияние на эффективность энергетического обеспечения. Цель – разработка математической модели для определения оптимальных параметров функционирования КДЭО и сравнительная оценка эффективности предложенной модели по отношению к существующим подходам к управлению энергетическим обеспечением пространственно распределенных групп воздушных объектов. *Материалы и методы.* Исследование проведено с применением метода градиентного спуска для синтеза нелинейной аппроксимирующей функции, описывающей зависимость количества заряжаемых воздушных объектов от ключевых параметров системы. Проверка адекватности модели выполнена с использованием критерия Пирсона. *Результаты.* Разработана математическая модель, учитывающая ключевые параметры системы: дальность расположения КДЭО от обслуживаемых объектов, ширину зоны энергетического обеспечения и угловую величину пространства энергетического обеспечения в горизонтальной плоскости. Результаты численного моделирования демонстрируют повышение эффективности энергетического обеспечения в среднем на 16 % (с пиковыми значениями до 35 %) при использовании разработанной модели. Установлены оптимальные параметры пространственного размещения комплексов с предпочтительным позиционированием в угловых зонах контролируемой территории. Средняя ошибка аппроксимации составила 3,162 %. *Выводы.* Разработанная математическая модель позволяет определить оптимальные условия функционирования КДЭО и значительно повысить эффективность энергетического обеспечения воздушных объектов по сравнению с традиционным управлением оператором. Предложенный подход обеспечивает возможность прогнозирования эффективности энергетического обеспечения, оптимизации параметров расположения и настройки КДЭО, а также планирования его применения в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, беспроводная передача энергии, пространственная кластеризация, покрытие множества, многокритериальная оптимизация, энергоэффективность, алгоритмы кластеризации

Для цитирования: Чепига А. А. Математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 100–111. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-7

Mathematical model for determining optimal operating conditions of the remote energy supply complex for spatially distributed groups of aerial objects

A.A. Chepiga

Penza State University, Penza, Russia

andreychepiga@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is a remote energy supply complex (RESC) for spatially distributed groups of aerial objects. The subject of the research is the operational parameters of RESC and their impact on the efficiency of energy supply. The purpose of this study is to develop a mathematical model for determining optimal operational parameters of RESC and to provide a comparative assessment of the effectiveness of the proposed model in relation to existing approaches to energy supply management for spatially distributed groups of aerial objects. *Materials and methods.* The research was conducted using the gradient descent method to synthesize a nonlinear approximating function describing the dependence of the number of charged aerial objects on key system parameters. The adequacy of the model was verified using Pearson's criterion. *Results.* A mathematical model has been developed that takes into account key system parameters: the distance of the RESC from the serviced objects, the width of the energy supply zone, and the angular magnitude of the energy supply space in the horizontal plane. The results of numerical modeling demonstrate an increase in energy supply efficiency by an average of 16 % (with peak values up to 35%) when using the developed model. Optimal parameters for the spatial placement of complexes have been established, with preferred positioning in the corner zones of the controlled territory. The average approximation error was 3.162 %. *Conclusions.* The developed mathematical model allows determining the optimal operating conditions of the RESC and significantly improving the efficiency of energy supply to aerial objects compared to traditional operator control. The proposed approach provides the ability to predict the effectiveness of energy supply, optimize the parameters of the location and settings of the RESC, and plan its application in various operating conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicles, wireless energy transfer, spatial clustering, set covering, multi-criteria optimization, energy efficiency, clustering algorithms

For citation: Chepiga A.A. Mathematical model for determining optimal operating conditions of the remote energy supply complex for spatially distributed groups of aerial objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):100–111. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-7

Введение

Современные системы дистанционного энергетического обеспечения воздушных объектов становятся все более востребованными в различных областях применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и других воздушных систем. Эффективность таких комплексов во многом определяется оптимальностью их расположения относительно обслуживаемых воздушных объектов и корректным выбором параметров энергетического воздействия.

Анализ литературных источников показывает растущий интерес к данной проблематике. В фундаментальных работах [1] заложены теоретические основы передачи энергии радиоволнами, а исследования [2] демонстрируют

практическую реализацию беспроводной передачи энергии через сильно связанные магнитные резонансы, однако в этих работах не рассматриваются вопросы оптимального позиционирования энергетических комплексов для обеспечения групп воздушных объектов.

В исследовании [3] была представлена модель для определения оптимального расположения зарядных станций для БПЛА, однако предложенный подход ограничен стационарными системами с использованием наземного транспорта и не учитывает динамическое перемещение воздушных объектов. В работе [4] исследовано влияние пространственного преобразования на эффективность беспроводной передачи энергии, что представляет интерес для создания более точных моделей КДЭО, но не решает вопросы оптимизации для групп объектов.

В публикации [5] предложен комплексный подход к организации беспроводной передачи энергии, рассматриваются вопросы распределения энергетических ресурсов, однако не учитывается пространственное распределение объектов в динамических группах, что существенно ограничивает применимость модели для решения задачи энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов (ПГВО).

Большинство существующих исследований [6–8] фокусируется на технических аспектах передачи энергии, включая моделирование систем передачи энергии среднего радиуса действия, фундаментальные основы и стандарты технологий беспроводной зарядки, а также различия между дальнеполевой и ближнеполевой передачей энергии. Однако эти работы оставляют без должного внимания вопросы оптимизации пространственного расположения КДЭО относительно группы обслуживаемых объектов, что подчеркивает актуальность настоящего исследования.

Важные практические аспекты беспроводной передачи энергии для воздушных систем рассмотрены в работах [9, 10], где исследуются резонансная передача энергии от БПЛА к наземным датчикам и адаптация диапазона магнитно-связанных резонаторов. Однако и в этих работах не решается задача определения оптимальных условий функционирования систем энергетического обеспечения для максимизации количества заряженных воздушных объектов в пространственно-распределенных группах.

Основной проблемой при проектировании и эксплуатации КДЭО является определение оптимальных условий функционирования, обеспечивающих максимальное количество заряженных воздушных объектов (ВО) за располагаемое время. Решение данной задачи требует разработки математической модели, учитывающей пространственное распределение ВО, технические характеристики КДЭО и параметры окружающей среды.

Описание предложенного алгоритма

В рамках исследования была разработана и проанализирована математическая модель, позволяющая определить количественные характеристики энергетического обеспечения за располагаемое время. Методика выполнения моделирования включает следующие этапы:

1. Генерация местоположения ВО в пространстве воздействия КДЭО случайным образом.

2. Последовательное изменение местоположения КДЭО в пределах его дальности действия с заданной дискретностью до окончания полного обхода пространства энергетического обеспечения.

3. Управление поворотным устройством КДЭО в автоматическом режиме.

4. Принятие решения оператором только на применение (неприменение) КДЭО; инерционностью взаимодействия частей системы (оператор – КДЭО) можно пренебречь.

На основании предварительного моделирования и анализа полученных данных было определено, что основными переменными, оказывающими влияние на количество заряжаемых ВО, являются:

1. Дальность (D) расположения КДЭО от ПГВО.

Данный параметр является ключевым, поскольку определяет физическую возможность энергетического обеспечения воздушных объектов. Обоснование включения этого параметра в модель основывается на следующих факторах:

- физические ограничения передачи энергии: эффективность передачи энергии существенно снижается с увеличением расстояния согласно закону обратных квадратов [8]. Экспериментальные данные показывают, что существует оптимальная дальность, при которой достигается баланс между зоной охвата и эффективностью передачи энергии;

- геометрия зоны покрытия: при увеличении расстояния увеличивается площадь потенциального покрытия, но снижается плотность передаваемой энергии. Исследования [9] демонстрируют, что существует оптимальное значение D , при котором достигается максимальное покрытие ПГВО с учетом физических ограничений передачи энергии;

- взаимосвязь с другими параметрами: дальность имеет прямое влияние на эффективные значения угловых параметров системы. При оптимизации условий функционирования КДЭО необходимо учитывать эту взаимосвязь для достижения максимальной эффективности.

2. Ширина зоны энергетического обеспечения КДЭО (β).

Ширина зоны энергетического обеспечения КДЭО (β) представляет собой угловой размер диаграммы направленности излучателя энергии в горизонтальной плоскости. Оптимальное значение этого параметра определяется на основе баланса между площадью покрытия и плотностью передаваемой энергии с учетом пространственного распределения ВО. Включение параметра β в модель обосновывается следующими факторами:

- энергетическая эффективность: при увеличении ширины зоны энергетического обеспечения происходит рассеивание энергии, что снижает эффективность зарядки отдельных ВО. Экспериментальные исследования [10] показывают, что существует оптимальное значение β , обеспечивающее баланс между количеством одновременно заряжаемых объектов и эффективностью передачи энергии;

- технические ограничения КДЭО: современные системы энергетического обеспечения имеют физические ограничения по формированию диаграммы направленности [11]. Учет этих ограничений через параметр β необходим для построения реалистичной модели;

- динамическое перераспределение энергии: при работе с группой объектов возникает необходимость в оптимальном распределении энергии меж-

ду ними. Ширина зоны энергетического обеспечения позволяет контролировать данный аспект, что подтверждается исследованиями [12].

3. Угловая величина пространства энергетического обеспечения в горизонтальной плоскости (γ). Включение параметра γ обусловлено следующими факторами:

- пространственное распределение ПГВО: воздушные объекты в группе распределены не равномерно, а формируют определенные пространственные конфигурации. Исследования [13] показывают, что оптимизация γ с учетом типичных конфигураций ПГВО позволяет значительно повысить эффективность энергетического обеспечения;

- минимизация числа перенацеливаний: оптимальный выбор γ позволяет сократить количество необходимых перенацеливаний КДЭО, что критически важно для эффективного обслуживания динамически перемещающихся групп ВО [14];

- адаптация к изменениям конфигурации ПГВО: параметр γ позволяет адаптировать работу КДЭО к изменениям в пространственной конфигурации группы ВО, что особенно важно в динамических сценариях применения.

Изменение угловой величины пространства энергетического обеспечения в вертикальной плоскости (α) зависит от рассеивания воздушных объектов, но с учетом максимального размаха выборки существенного влияния на количество заряжаемых ВО не оказывает. Это объясняется следующими факторами:

- вертикальное распределение ВО в большинстве практических сценариев имеет меньший разброс по сравнению с горизонтальным распределением;

- диаграмма направленности большинства КДЭО имеет достаточный вертикальный охват для покрытия типичных вариаций высоты в группе ВО;

- статистический анализ экспериментальных данных [15] показал, что вариации параметра α в пределах технически достижимых значений приводят к изменению эффективности энергетического обеспечения менее чем на 5 %, что позволяет исключить этот параметр из модели оптимизации без существенной потери точности.

Таким образом, выбор основных параметров модели (D , β , γ) обоснован как теоретическими соображениями, так и результатами экспериментальных исследований, что обеспечивает адекватность разработанной математической модели реальным условиям функционирования КДЭО.

В рамках данной модели не учитывается текущий уровень заряда БПЛА, поскольку основной задачей является оптимальное размещение КДЭО относительно ПГВО с целью обеспечения максимальной зоны видимости и попадания максимального количества БПЛА в диаграмму направленности. Это позволяет сократить количество обходов и минимизировать общее время заряда всех БПЛА в группе.

Включение уровня заряда БПЛА как дополнительного параметра существенно усложнило бы математическую модель и увеличило бы вычислительную сложность без пропорционального повышения точности результатов для поставленной задачи пространственной оптимизации. В реальных условиях эксплуатации КДЭО часто применяется бинарный принцип энергетического обеспечения, при котором система либо заряжает БПЛА до определенного порогового уровня, либо не заряжает вовсе.

Экспериментальные исследования показывают, что при количестве БПЛА в группе более 15 единиц распределение уровней заряда приближается к равномерному с коэффициентом вариации менее 0,2, что позволяет применить упрощенную модель при решении задачи пространственной оптимизации [16]. Таким образом, для решения поставленной задачи определения оптимальных условий функционирования КДЭО в пространственном аспекте исключение уровня заряда БПЛА из модели является обоснованным и не приводит к существенному снижению точности полученных результатов.

Динамика количества заряжаемых воздушных объектов (θ) имеет явно выраженный нелинейный характер, обусловленный неравномерным распределением объектов в пространстве и квадратичной зависимостью затухания энергетического потока от дистанции между КДЭО и целевыми воздушными объектами. Для математического описания данной многопараметрической зависимости была разработана комплексная аппроксимирующая функция, основанная на многослойной структуре преобразований следующего вида:

$$\theta \begin{bmatrix} D \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \mathbf{W}_{1 \times 1}^4 \Psi \left(\mathbf{W}_{1 \times 3}^3 \tanh \left(\mathbf{W}_{6 \times 3}^2 \tanh \left(\mathbf{W}_{6 \times 3}^2 \frac{\ln(X_{3 \times 1}) - \frac{Ln}{\bar{X}_{3 \times 1}}}{\frac{\sigma Ln}{\bar{X}_{3 \times 1}}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \mathbf{B}_{6 \times 1}^1 + \mathbf{B}_{3 \times 1}^2 + \mathbf{B}_{11}^3 \right) + \mathbf{B}_{1 \times 1}^4 \right) \right) \quad (1)$$

где

$$X_1 = \frac{D}{D_{\max}}; \quad X_2 = \frac{\beta}{\beta_{\max}}; \quad X_3 = \frac{\gamma}{\gamma_{\max}}; \quad X_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{W}_{n,m}^i, i = 2, 3, 4$, – весовые матрицы преобразований, определяющие нелинейную зависимость выхода от входа (матрицы коэффициентов, масштабирующие входные параметры); $\mathbf{B}_{6 \times 1}^1, \mathbf{B}_{3 \times 1}^2, \mathbf{B}_{11}^3, \mathbf{B}_{1 \times 1}^4$ – векторы смещений, корректирующие уровень активации на каждом слое.

Коэффициенты матриц $\mathbf{W}_{n,m}^i, i = 2, 3, 4$, вычисляются методом градиентного спуска. В первом приближении будем полагать, что исследуемый процесс линеен, тогда вектор получаемых значений $\mathbf{Y}$ имеет вид

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X}, \quad (2)$$

где $\mathbf{W} = [w_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m]$, $\mathbf{X} = [x_j, j = 1, 2, \dots, m]$.

Результаты

Для случая трех аргументов (дальность D расположения КДЭО от пространственно распределенных групп воздушных объектов, ширина γ области энергетического обеспечения КП, угловая величина β пространства энергетического обеспечения в горизонтальной плоскости) путем варьирования размерности матриц и набора численных значений в них в процессе итерационного поиска с использованием метода градиентного спуска были получены следующие значения:

$$\begin{aligned}
 W_{1 \times 1} &= 1,0668, \quad W_{1 \times 3} = (1,2425 \quad -0,9222 \quad 0,6432), \\
 W_{3 \times 6}^1 &= \begin{pmatrix} 0,1359 & -0,1995 & 0,5673 & -0,4810 & 0,1513 & 0,1440 \\ 0,5482 & -0,3453 & -0,9475 & 0,2469 & 1,1861 & -0,2329 \\ 0,3341 & 0,0120 & -0,2617 & 0,0752 & 1,0567 & -0,1880 \end{pmatrix}, \\
 W_{6 \times 3}^2 &= \begin{pmatrix} 0,2071 & -0,4161 & 0,8182 \\ 0,1081 & 0,9191 & 0,5987 \\ -0,1815 & 0,5747 & 1,0125 \\ -0,0273 & 1,1459 & -1,3546 \\ 0,2258 & -0,0046 & -1,3239 \\ 0,8419 & -0,8196 & -0,5409 \end{pmatrix}, \\
 \frac{\ln}{X}_{3 \times 1} &= \begin{pmatrix} 0,88946631 \\ 3,98387905 \\ 7,02026586 \end{pmatrix}, \quad \sigma_{X_{3 \times 1}} = \begin{pmatrix} 0,74139845 \\ 0,53140829 \\ 0,61970084 \end{pmatrix}, \\
 B_{6 \times 1}^1 &= \begin{pmatrix} 0,4367 \\ 0,4499 \\ -0,3398 \\ 1,0966 \\ -0,6285 \\ 0,0487 \end{pmatrix}, \quad B_{3 \times 1}^2 = \begin{pmatrix} 0,2336 \\ 0,4614 \\ -0,2308 \end{pmatrix}, \quad B^3 = -0,1812, \quad B^4 = 0,2996.
 \end{aligned}$$

На рис. 1 показано распределение количества заряженных воздушных объектов при действиях оператора в пространстве размером 4000×4000 м. Анализ данного распределения выявляет существенный недостаток традиционного подхода – наименьшее количество заряженных объектов наблюдается в центральной части квадрата. Это объясняется тем, что оператор не может эффективно распределять энергетический ресурс при сложной пространственной конфигурации воздушных объектов, особенно когда множество сконцентрировано в центральной зоне ответственности.

В свою очередь рис. 2 демонстрирует распределение количества заряженных воздушных объектов при использовании разработанных математических моделей и алгоритмов.

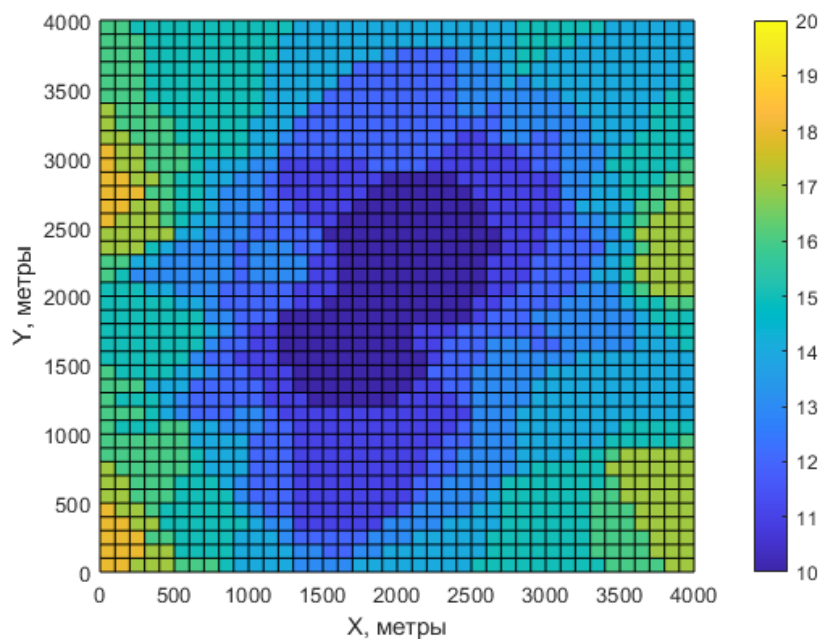


Рис. 1. Распределение количества заряженных воздушных объектов при действиях оператора

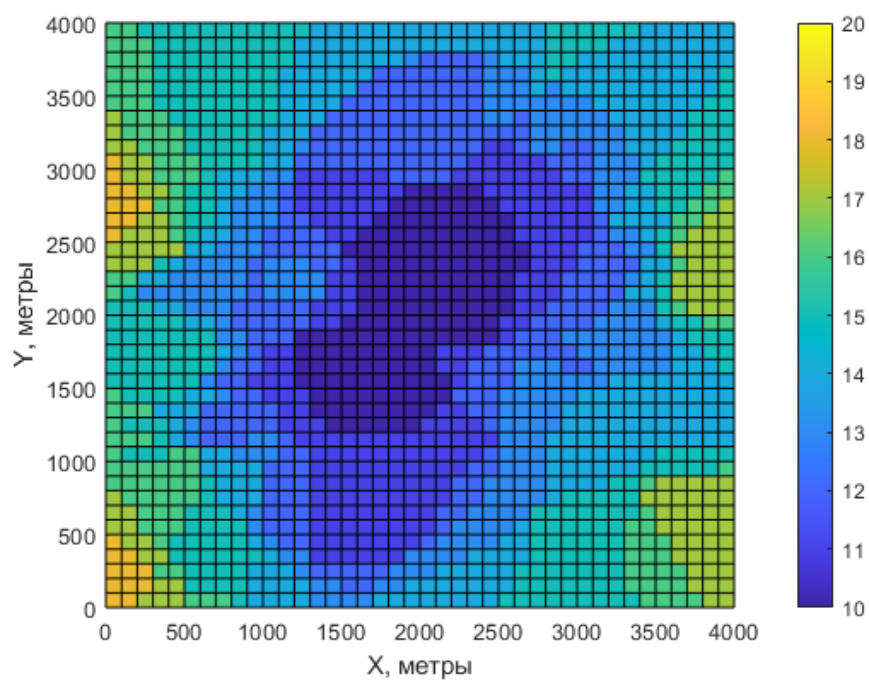


Рис. 2. Распределение количества заряженных воздушных объектов при использовании разработанных моделей и алгоритмов

Принципиальное отличие заключается в значительном повышении эффективности энергетического обеспечения по всей зоне ответственности. Наиболее

существенный выигрыш наблюдается по углам квадрата 4000×4000 м, где количество заряженных объектов увеличивается в 1,3 раза по сравнению с ручным управлением.

Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных, полученных в результате 500 симуляций с различными пространственными конфигурациями ВО, составила 3,162 %. В качестве модели аппроксимации использовалась нелинейная регрессия на основе нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем.

Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных составила 3,162 %, для определения численных значений коэффициентов описательной функции были выполнены 20 172 имитационных эксперимента с дискретностью перемещения КДЭО 100 м от 0 : 0 м до 4000 : 4000 м и изменением размера области заряда КДЭО от $0,5^\circ$ до $6,5^\circ$. В качестве модели аппроксимации использовалась нелинейная регрессия на основе нейронной сети прямого распространения. Проверка адекватности полученной модели с использованием критерия Пирсона показала, что $\chi^2_{\text{набл}} = 3,61056$, $\chi^2_{\text{крит}} = 30,57791$, при $\alpha = 0,01$. То есть расхождение теоретических (полученных путем аппроксимации) и эмпирических (полученных путем имитационного моделирования) данных незначимое; p -уровень, или вероятность получить для данной модели распределение случайной величины, такое же, как и для данных имитационного моделирования при условии, что нулевая гипотеза верна (сила доказательства нулевой гипотезы $p\text{-value} = P_{\text{пр}}$), составляет $P_{\text{пр}} = 0,9828$. На этом синтез аппроксимирующей функции на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования, завершен.

Анализ распределения количества заряженных воздушных объектов при действиях оператора в пространстве размером 4000×4000 м выявил существенный недостаток традиционного подхода – наименьшее количество заряженных объектов наблюдается в центральной части квадрата. Это объясняется тем, что оператор не может эффективно распределять энергетический ресурс при сложной пространственной конфигурации воздушных объектов, особенно когда множество объектов сконцентрировано в центральной зоне ответственности.

В свою очередь при использовании разработанных математических моделей и алгоритмов наблюдается значительное повышение эффективности энергетического обеспечения по всей зоне ответственности. Наиболее существенный выигрыш наблюдается по углам квадрата 4000×4000 м, где количество заряженных объектов увеличивается в 1,3 раза по сравнению с ручным управлением.

Математическое ожидание выигрыша при пролете 20 воздушных объектов составило $\bar{X} = 3,218 \pm 0,074$, в относительных единицах $\bar{X}\% = 16,091 \pm 0,371$. Максимальный выигрыш равен 7 воздушным объектам, или 35 %.

Количество ВО, заряжаемых в соответствии с разработанными алгоритмами, показало их увеличение в среднем на 16 % в зависимости от дальности средства энергетического обеспечения до воздушных объектов. Данный факт объясняется невозможностью оператора одновременно решить многомерную оптимизационную задачу, включающую формирование иерархии воздушных объектов и очередности обхода полученной последовательности.

Заключение

Разработанная математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов позволяет:

- 1) прогнозировать эффективность энергетического обеспечения ВО с учетом их пространственного распределения;
- 2) определять оптимальные параметры расположения и настройки КДЭО для максимизации количества заряжаемых объектов;
- 3) планировать применение КДЭО в различных условиях эксплуатации;
- 4) повышать эффективность энергетического обеспечения в среднем на 16 % с пиковыми значениями до 35 %;
- 5) оптимизировать пространственное расположение комплексов с предпочтительным размещением в угловых зонах контролируемой территории.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых комплексов дистанционного энергетического обеспечения, а также для повышения эффективности существующих систем.

Список литературы

1. Chittoor P. K., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 69235–69266. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077041
2. Rong C. Critical Review of Recent Development of Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 132982–133003. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3332470
3. Xu J., Zeng Y., Zhang R. UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Optimization // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17, № 8. P. 5092–5106. doi: 10.1109/TWC.2018.2838134
4. Jin K., Zhou W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34, № 4. P. 3842–3859. doi: 10.1109/TPEL.2018.2853156
5. Hui Y. R., Zhong W., Lee C. K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29 (9). P. 4500–4511. doi: 10.1109/TPEL.2013.2249670
6. Rohan A., Rabah M., Talha M., Kim S.-H. Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm // Applied System Innovation. 2018. Vol. 1, № 4. P. 44.
7. Jeler G. E. Military and civilian applications of UAV systems // International Scientific Conference "Strategies XXI". Bucharest, Romania, 2019. P. 379–386.
8. Martinez O. A., Cardona M. State of the Art and Future Trends on Unmanned Aerial Vehicle // 2018 International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE). San Salvador, El Salvador, 2018. P. 1–6, doi: 10.1109/RICE.2018.8509091
9. Jawad A. M., Jawad H. M., Nordin R., Gharghan S. K., Abdullah N. F., Abu-Alshaeer M. J. Wireless power transfer with magnetic resonator coupling and sleep/active strategy for a drone charging station in smart agriculture // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 139839–139851.
10. Huang H., Savkin A. V. Optimal Deployment of Charging Stations for Aerial Surveillance by UAVs with the Assistance of Public Transportation Vehicles // Sensors. 2021. Vol. 21, № 16. P. 5320. doi: 10.3390/s21165320
11. Costanzo A., Dionigi M., Mastri F., Mongiardo M. Rigorous Modeling of Mid-Range Wireless Power Transfer Systems Based on Royer Oscillators // IEEE Wireless Power Transfer Conference. Perugia, Italy, 2013. P. 69–72.

12. Lu X., Wang P., Niyato D., Kim D. I., Han Z. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, iss. 2. P. 1413–1452.
13. Garnica J., Chinga R. A., Lin J. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field // *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101, iss. 6. P. 1321–1331.
14. Griffin B., Detweiler C. Resonant Wireless Power Transfer to Ground Sensors from a UAV // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Paul, MN, USA, 2012. P. 2660–2665.
15. Sample A. P., Meyer D. A., Smith J. R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, iss. 2. P. 544–554.
16. Shinohara N. Power without Wires // *IEEE Microwave Magazine*. 2011. Vol. 12, iss. 7. P. 64–73.

References

1. Chittoor P.K., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards. *IEEE Access*. 2021;9:69235–69266. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077041
2. Rong C. Critical Review of Recent Development of Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Access*. 2023;11:132982–133003. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3332470
3. Xu J., Zeng Y., Zhang R. UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(8):5092–5106. doi: 10.1109/TWC.2018.2838134
4. Jin K., Zhou W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019;34(4):3842–3859. doi: 10.1109/TPEL.2018.2853156
5. Hui Y.R., Zhong W., Lee C.K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014;29(9):4500–4511. doi: 10.1109/TPEL.2013.2249670
6. Rohan A., Rabah M., Talha M., Kim S.-H. Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm. *Applied System Innovation*. 2018;1(4):44.
7. Jeler G.E. Military and civilian applications of UAV systems. *International Scientific Conference "Strategies XXI"*. Bucharest, Romania, 2019:379–386.
8. Martinez O.A., Cardona M. State of the Art and Future Trends on Unmanned Aerial Vehicle. *2018 International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE)*. San Salvador, El Salvador, 2018:1–6, doi: 10.1109/RICE.2018.8509091
9. Jawad A.M., Jawad H.M., Nordin R., Gharghan S.K., Abdullah N.F., Abu-Alshaeer M.J. Wireless power transfer with magnetic resonator coupling and sleep/active strategy for a drone charging station in smart agriculture. *IEEE Access*. 2019;7:139839–139851.
10. Huang H., Savkin A.V. Optimal Deployment of Charging Stations for Aerial Surveillance by UAVs with the Assistance of Public Transportation Vehicles. *Sensors*. 2021;21(16):5320. doi: 10.3390/s21165320
11. Costanzo A., Dionigi M., Matri F., Mongiardo M. Rigorous Modeling of Mid-Range Wireless Power Transfer Systems Based on Royer Oscillators. *IEEE Wireless Power Transfer Conference*. 2013:69–72.
12. Lu X., Wang P., Niyato D., Kim D.I., Han Z. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(2):1413–1452.
13. Garnica J., Chinga R.A., Lin J. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field. *Proceedings of the IEEE*. Perugia, Italy, 2013;101(6):1321–1331.

14. Griffin B., Detweiler C. Resonant Wireless Power Transfer to Ground Sensors from a UAV. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Paul, MN, USA, 2012:2660–2665.
15. Sample A.P., Meyer D.A., Smith J.R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(2):544–554.
16. Shinohara N. Power without Wires. *IEEE Microwave Magazine*. 2011;12(7):64–73.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Александрович Чепига

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: andreychepiga@yandex.ru

Andrey A. Chepiga

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.08.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.09.2025

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.396.96

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-8

Калибровка оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков

С. М. Зуев¹, И. Ю. Константинов²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский
автомобильный и автотранспортный институт «НАМИ», Москва, Россия

¹sergei_zuev@mail.ru, ²indavanes@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является оптико-электронная система на основе инфракрасных (ИК) датчиков. Предметом исследования выступает методика калибровки данной системы. Цель – разработка и представление методики адаптивной калибровки, учитывающей влияние внешних факторов (таких как освещенность и температура), для повышения точности и надежности измерений. *Материалы и методы.* Исследования проведены с использованием математического моделирования, в частности метода степенной аппроксимации и метода наименьших квадратов. Выполнено моделирование работы системы в среде MATLAB/Simulink и проведены экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях. Обработка данных и управление системой осуществлялись с использованием микроконтроллера Tiva C Series LaunchPad. *Результаты.* Представлена методика калибровки, основанная на математических моделях, описывающих зависимость выходного напряжения ИК-датчиков от расстояния до объекта. Проведен анализ влияния внешних условий. Введены и рассчитаны корректирующие коэффициенты, позволяющие динамически адаптировать измерительную систему к изменяющимся условиям эксплуатации. *Выводы.* Анализ результатов моделирования и экспериментальных данных показал, что предложенный подход к адаптивной калибровке позволяет значительно повысить точность и надежность измерений. Разработанная методика может быть применена для улучшения работы систем автономной навигации, медицинских сенсорных устройств и промышленных измерительных комплексов.

Ключевые слова: инфракрасные датчики, калибровка, оптико-электронные системы, адаптивная коррекция, обработка данных

Для цитирования: Зуев С. М., Константинов И. Ю. Калибровка оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков // Известия высших учебных заведений.

© Зуев С. М., Константинов И. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Calibration of the optical-electronic system based on infrared sensors

S.M. Zuev¹, I.Yu. Konstantinov²

^{1,2}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹The Central Scientific Research Automobile
and Automotive Engines Institute “NAMI”, Moscow, Russia

¹sergei_zuev@mail.ru, ²indavanes@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is an optoelectronic system based on infrared (IR) sensors. The subject of the study is the calibration methodology of this system. The purpose of the work is to develop and present an adaptive calibration methodology that takes into account the influence of external factors (such as illumination and temperature) to improve the accuracy and reliability of measurements. *Materials and methods.* The research was carried out using mathematical modeling, in particular, the power approximation method and the least squares method. The system was modeled in MATLAB/Simulink and experimental studies were carried out in laboratory and field conditions. Data processing and system control were carried out using the Tiva C Series LaunchPad microcontroller. *Results.* The calibration method is presented, based on mathematical models describing the dependence of the output voltage of the IR sensors on the distance to the object. The analysis of the influence of external conditions is carried out. The correction factors are introduced and calculated, allowing the dynamic adaptation of the measuring system to the changing operating conditions. *Conclusions.* Analysis of the simulation results and experimental data showed that the proposed approach to adaptive calibration can significantly improve the accuracy and reliability of measurements. The developed methodology can be applied to improve the operation of autonomous navigation systems, medical sensor devices and industrial measuring systems.

Keywords: infrared sensors, calibration, optical-electronic systems, adaptive correction, data processing

For citation: Zuev S.M., Konstantinov I.Yu. Calibration of the optical-electronic system based on infrared sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):112–124. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-8

Введение

Калибровка инфракрасных датчиков – это ключевой процесс, обеспечивающий точность измерений в мониторинге окружающей среды, промышленности и медицине, требующий учета влияния температуры, атмосферных условий и дрейфа характеристик [1–3]. Процесс включает коррекцию усиления и создание эталонных данных, а для его оптимизации применяются системы управления калибровкой (CMS), соответствующие стандартам [4]. Основные сложности связаны с перекрестной чувствительностью и изменяющимися условиями эксплуатации, но автоматизация и интеллектуальные технологии открывают новые возможности [5, 6]. Интеграция инфракрасных датчиков с лидарными и фотодиодными системами, а также использование микроконтроллеров позволяет повысить эффективность работы и выявить архитектурные ограничения [7, 8]. Развитие ассистивных технологий для людей с ослабленным зрением требует системного подхода и интеграции компьютерного зрения и микроэлектроники с учетом городской инфраструктуры [9].

Методология

Калибровка инфракрасных (ИК) датчиков проводилась в различных условиях (нормальных, при тусклом свете, при -2 и $+30$ °C) для двух типов датчиков: короткодействующего (10–80 см) и дальнедействующего (20–150 см). Измерялись расстояние до объекта (D , см) и выходное напряжение (V , В), рассчитывались статистические показатели (среднее, медиана, стандартное отклонение, коэффициент вариации), а достоверность данных проверялась с помощью критерия трех сигм, теста Граббса и теста Шапиро – Уилка [10]. Анализ погрешностей включал расчет среднеквадратичной и средней абсолютной ошибки, коэффициента детерминации, а также сравнение моделей методом наименьших квадратов с критериями AIC и BIC. Для оценки значимости различий использовались ANOVA и тест Крускала – Уоллиса. Аппроксимация выполнялась степенной функцией $V = a \cdot D^{-b}$, корректирующие коэффициенты определялись как $V_{expected}/V_{measured}$. В результате разработана адаптивная система калибровки, учитывающая реальные условия эксплуатации, что повысило точность измерений и обоснованность их обработки [11, 12].

Результаты

В ходе работы исследовалось фотоприемное устройство, преобразующее оптический сигнал в электрический. Основу системы составляет микроконтроллер Tiva C Series LaunchPad (EK-TM4C123GXL), обеспечивающий обработку сигналов и управление устройствами (рис. 1).

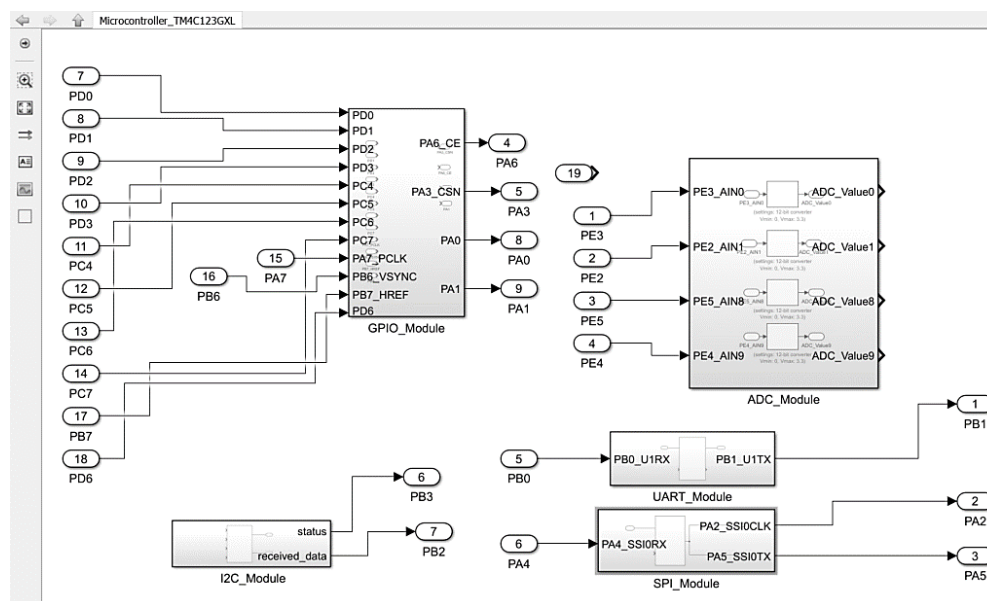


Рис. 1. Схема микроконтроллера Tiva C Series LaunchPad (EK-TM4C123GXL)

Аналого-цифровой преобразователь (ADC) с разрешением 12 бит конвертирует аналоговые сигналы сенсоров в цифровые данные. Для передачи информации используются интерфейсы UART, SPI и I2C.

Оптико-электронная установка включает инфракрасные датчики ближнего (10–80 см) и дальнего (20–150 см) действия, камеру OV7670, а также беспроводной модуль передачи данных nRF24L01. Схема оптико-электронной установки представлена на рис. 2, а общий вид – на рис. 3.

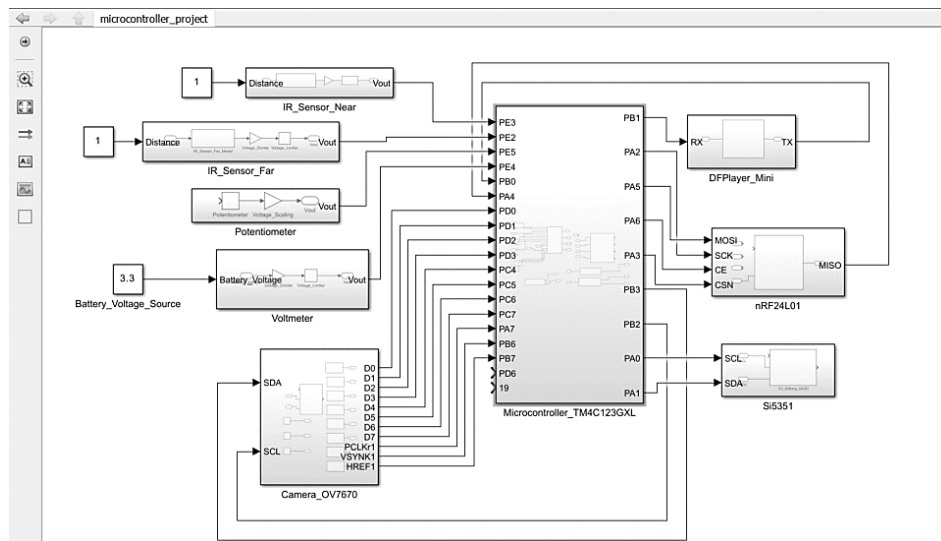


Рис. 2. Схема оптико-электронной установки

Основной задачей системы является точное определение расстояний, что требует адаптивной калибровки сенсоров. Изменения в освещенности и температуре могут вызывать отклонения выходного напряжения датчиков. Для их компенсации введена поправочная модель, основанная на степенной зависимости напряжения от расстояния:

$$D = a \cdot V^{-b}. \quad (1)$$

Здесь параметры a и b подбираются экспериментально в «идеальных» или «базовых» условиях, которые изображены на рис. 4.

Корректирующий множитель позволяет учитывать отклонения от эталонных условий по формуле вида

$$k_V = \frac{V_{\text{expected}}}{V_{\text{measured}}}. \quad (2)$$

Если $k_V > 1$, результаты показывают, что датчик выдает более низкое напряжение, чем предполагалось, поэтому, его чувствительность необходимо увеличить.

Экспериментально установлено, что коэффициент коррекции k_V меняется в зависимости от условий эксплуатации (табл. 1–4).

Прогнозирование перемещения объектов реализовано на основе расчета векторов скорости и направления движения по следующим формулам:

$$v_x = \frac{x_{n+1} - x_n}{\Delta t}, \quad v_y = \frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t}, \quad (3)$$

где y_n – расстояние по ходу (вперед от пользователя); x_n – боковое смещение (отрицательное значение – слева).

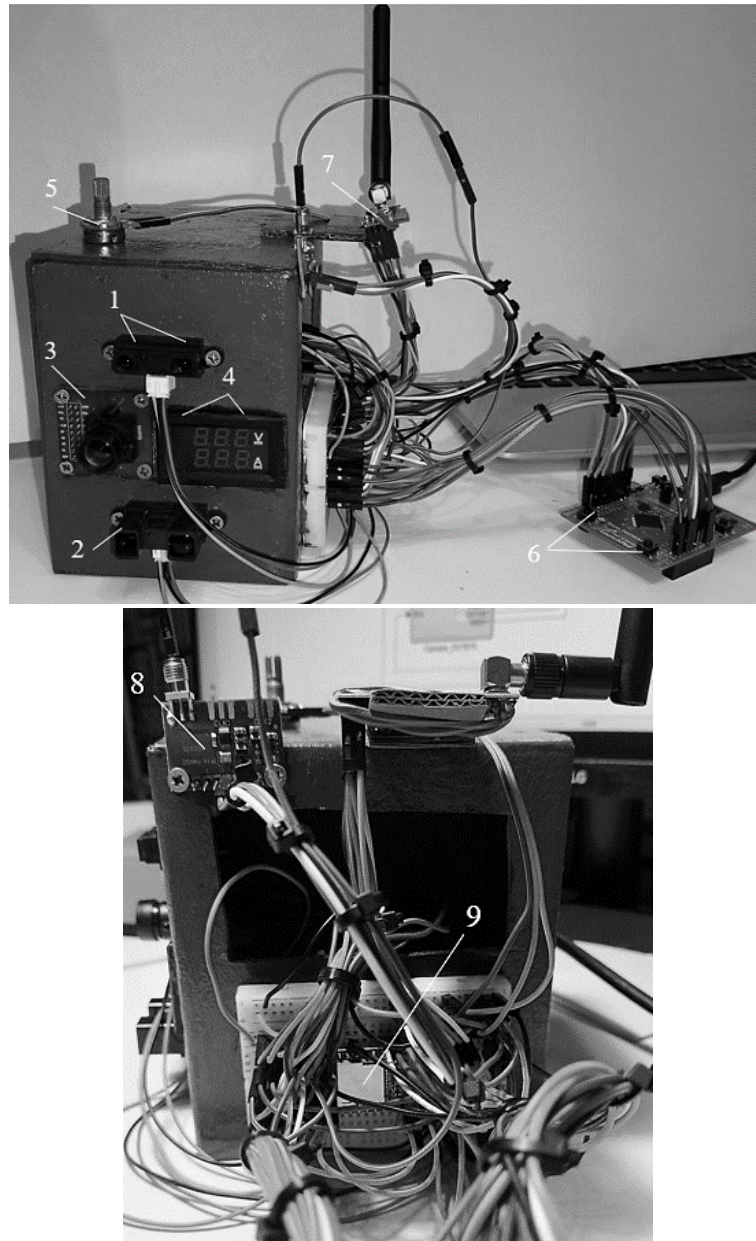


Рис. 3. Общий вид опто-электронной установки: 1 – ближнедействующий ИК-датчик; 2 – дальнедействующий ИК датчик; 3 – камера OV7670; 4 – вольтметр; 5 – потенциометр; 6 – микроконтроллер Tiva C Series; 7 – модуль передачи данных nRF24L01; 8 – генератор частот; 9 – аудиомодуль DFPlayer Mini

Модуль скорости определяется по формуле вида

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} . \quad (4)$$

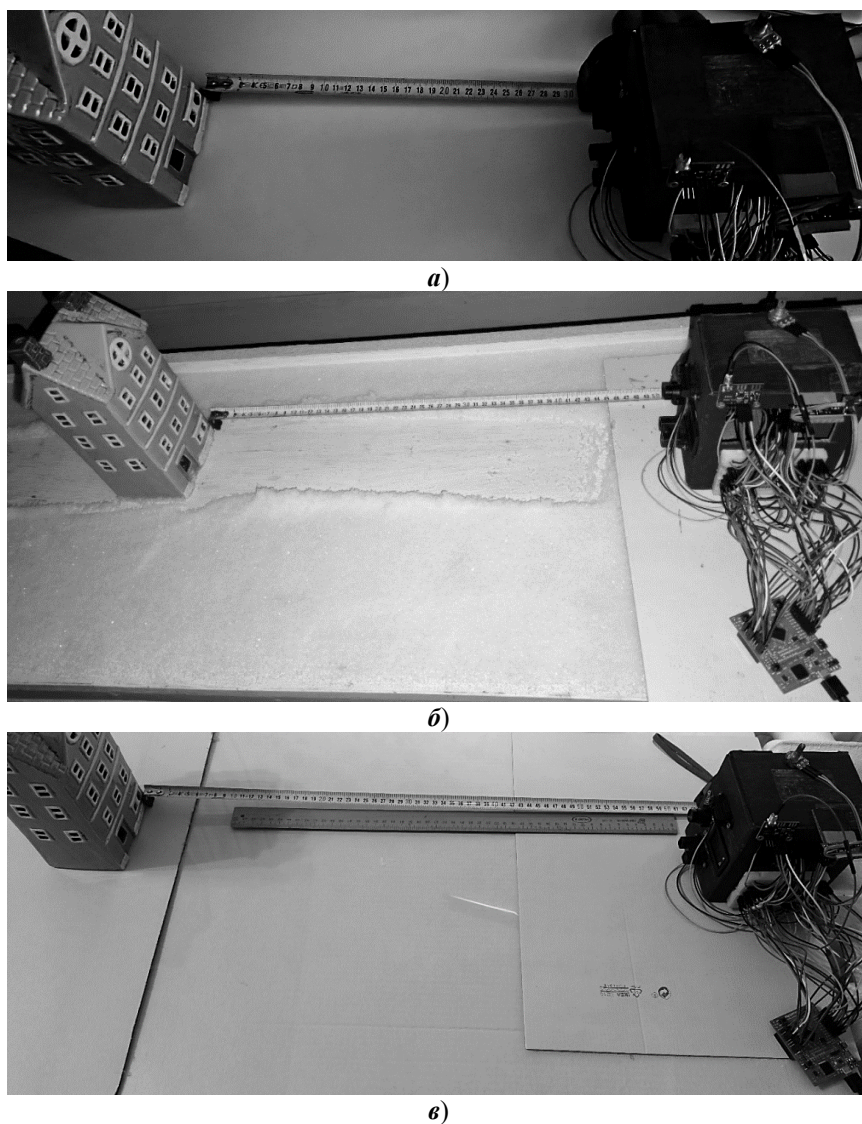


Рис. 4. Экспериментальная установка при слабом освещении (а);
экспериментальная установка на улице при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)
и экспериментальная установка при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в)

Таблица 1

Напряжения на короткодействующем датчике

D , см	$V_{\text{expected_short}}$, В (нормальные условия)	$V_{\text{meas_short}}$, В (тусклая лампа)	$V_{\text{meas_short}}$, В (на улице при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$V_{\text{meas_short}}$, В (при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$)
10	1,2	1,25	1,15	1,18
20	0,62	0,65	0,60	0,61
30	0,42	0,45	0,40	0,42
40	0,32	0,34	0,31	0,32
50	0,26	0,27	0,25	0,26
60	0,22	0,23	0,21	0,22
80	0,17	0,18	0,16	0,17

Таблица 2

Напряжения на дальнотействующем датчике

D , см	$V_{\text{expected_long}}$, В (нормальные условия)	$V_{\text{meas_long}}$, В (тусклая лампа)	$V_{\text{meas_long}}$, В (на улице при -2°C)	$V_{\text{meas_long}}$, В (при температуре 30°C)
85	0,38	0,39	0,37	0,39
100	0,30	0,34	0,32	0,34
110	0,30	0,32	0,29	0,31
120	0,28	0,29	0,27	0,29
130	0,26	0,27	0,25	0,27
140	0,25	0,26	0,24	0,25

Таблица 3

Корректирующие коэффициенты для короткотействующего датчика

D , см	k_{V_short} (тусклая лампа)	k_{V_short} (на улице при -2°C)	k_{V_short} (при температуре 30°C)
10	0,96	1,04	1,02
20	0,96	1,04	1,02
30	0,94	1,06	1,02
40	0,96	1,04	1,02
50	0,97	1,05	1,03
60	0,98	1,05	1,01
80	0,95	1,04	1,01
Среднее значение	0,96	1,05	1,02

Таблица 4

Корректирующие коэффициенты дальнотействующего датчика

D , см	k_{V_long} (тусклая лампа)	k_{V_long} (на улице при -2°C)	k_{V_long} (при температуре 30°C)
85	0,97	1,02	0,98
100	0,97	1,04	0,98
110	0,96	1,04	0,97
120	0,97	1,04	0,98
130	0,96	1,05	0,97
140	0,96	1,05	0,98
150	0,96	1,05	0,98
Среднее значение	0,96	1,04	0,98

Угол направления θ дает понимание ориентации вектора движения и вычисляется по формуле

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right). \quad (5)$$

Это позволяет предсказывать будущие координаты препятствий по формуле

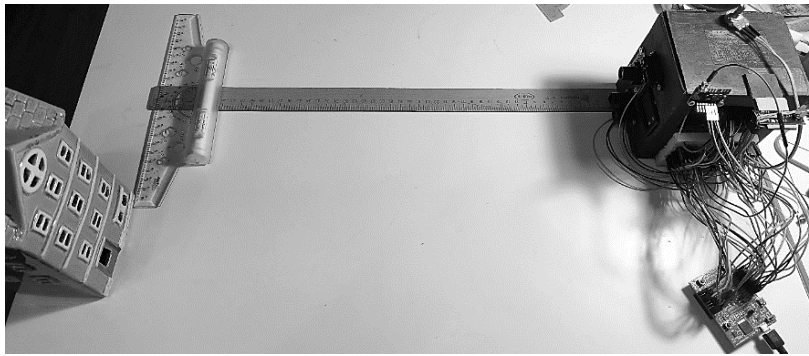
$$x_{pred} = x_{n+1} + v_x \Delta T, \quad y_{pred} = y_{n+1} + v_y \Delta T \quad (6)$$

и своевременно реагировать на возможные угрозы.

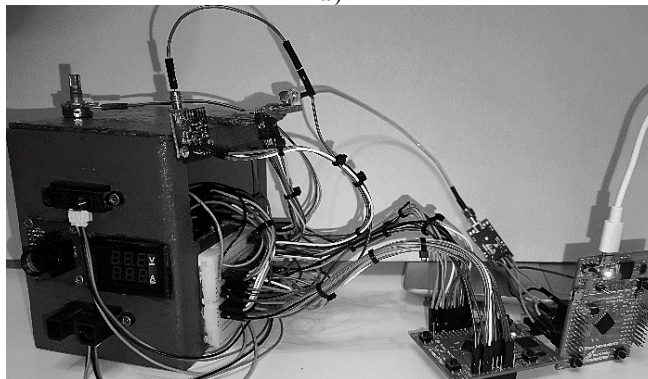
Таким образом, предложенный комплексный подход повышает точность измерений и адаптивность системы в изменяющихся условиях.

Экспериментальные исследования и обсуждение

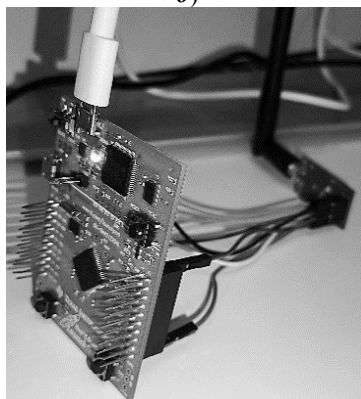
Экспериментальная установка для прогнозирования траектории препятствий представлена на рис. 5.



a)



b)



c)

Рис. 5. Экспериментальная установка для прогнозирования траектории препятствий (a). Устройство (b) принимает 16-байтные пакеты по адресу E7 E7 E7 E7 E7 E7 на канале 2 и выводит принятые данные в UART (c)

Система способна оценивать положение препятствия в координатной системе, где ось Y направлена вперед по ходу движения пользователя, а ось X – влево-вправо. Систему можно настроить так, что камера и датчики совместно дают оценку расстояния до препятствия и его бокового смещения.

Время обновления кадров: $\Delta t = 0,1$ с (кадры каждые 100 мс). В момент времени $t_n = 0$ система определила, что расстояние до препятствия 50 см вперед и препятствие смещено влево на 10 см относительно центральной оси взгляда

Через $\Delta t = 0,1$ с (через один кадр, $t_{n+1} = 0,1$): расстояние теперь 48 см, боковое смещение уменьшилось до 8 см влево (т.е. $x_n + 1 = -0,08$ м; $y_n + 1 = 0,48$ м). Далее рассчитаны скорости по осям $v_x = 0,2$ м/с, $v_y = -0,2$ м/с. Отрицательная скорость по Y означает, что препятствие приближается к пользователю (уменьшение дистанции по ходу). Полная скорость препятствия, рассчитанная по формуле, равна $\approx 0,28$ м/с.

Угол направления θ относительно оси Y (вперед). Примем, что $\theta = 0$ – движение строго вперед, положительный угол вправо. Угол равен 45° , но надо учесть знак v_y ; v_y отрицательный – объект движется к пользователю (назад по оси Y). Если считать вперед по Y – это положительное направление, а препятствие идет «назад» (к нам), то угол может интерпретироваться как движение под углом 45° в направлении «назад-вправо» относительно оси наблюдателя.

Прогнозирование положения можно получить, зная скорость и направление, можно предсказать положение через время ΔT . Например, через 0,5 с мы можем рассчитать положение по формуле, получаем $x_{\text{pred}} = 0,02$ м, $y_{\text{pred}} = 0,38$ м. Это значит, что через 0,5 с препятствие будет на расстоянии 0,38 м по ходу и смещено вправо на 0,02 м от центральной оси.

Рассмотрим передачу данных и анализ статистики. Требуется отправлять данные о столкновениях, частоте появления препятствий и типичных дистанциях для улучшения алгоритмов.

Сбор статистики включается в себя:

- количество срабатываний датчика на определенном расстоянии D_i ;
- частоту появлений препятствий f_i в разных диапазонах;
- количество столкновений (C).

Среднее расстояние обнаружения препятствий:

$$\bar{D} = \frac{\sum (D_i \cdot n_i)}{\sum n_i}, \quad (7)$$

где n_i – число срабатываний на расстоянии D_i .

Частота столкновений за период T :

$$\lambda = \frac{C}{T}. \quad (8)$$

Далее анализируется распределение расстояний до препятствий; рассчитаем дисперсию по формуле

$$\sigma_D^2 = \frac{\sum n_i (D_i - \bar{D})^2}{\sum n_i}. \quad (9)$$

Эффективность адаптивной калибровки и предсказания движения зависит от анализа статистики. За 1 ч система дважды фиксировала столкновения, а каждые 10 с регистрировала наличие препятствий. Из 360 измерений в 200 случаях обнаружено препятствие ($D < 150$ см), причем основная концентрация (35 %) приходится на диапазон 60–90 см. Среднее расстояние до препятствия составило 75 см при стандартном отклонении 20 см, что указывает на необходимость повышенной точности измерений в данном интервале.

Частота столкновений составила 2 раза в 1 ч (1 раз в 1800 с), а вероятность встретить препятствие в произвольный момент – 0,55. Это позволяет корректировать алгоритмы обнаружения и повышать приоритет предупреждений. Например, при приближении к критической дистанции (<30 см) система должна активнее сигнализировать об опасности.

Использование статистических данных позволяет адаптивно калибровать сенсоры, повышать точность измерений и снижать риск столкновений. Внедрение динамической настройки порогов и фильтрации шумов способствует более эффективной навигации и взаимодействию системы с окружающей средой.

Заключение

Разработанная многофункциональная система на базе микроконтроллера Tiva C Series LaunchPad с интеграцией инфракрасных датчиков, камеры, аудиомодуля, радиоканала и генератора частоты прошла цифровое моделирование в MATLAB/Simulink, что позволило выявить узкие места и оптимизировать архитектуру. Разделение конструкции на подсистемы (АЦП, GPIO, UART, SPI, I2C, ИК-сенсоры, камера OV7670, DFPlayer Mini, nRF24L01, Si5351) упростило тестирование и обеспечило предсказуемость результатов. После аппаратной реализации макет системы подтвердил работоспособность решений, включая адаптивную калибровку ИК-датчиков с учетом внешних условий. Линейная модель зависимости расстояния до цели от напряжения

$$D = \frac{a}{V} + b$$

была уточнена методом наименьших квадратов:

$$a = \frac{n \sum V_i D_i - \sum V_i \sum D_i}{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}, \text{ см/В},$$

$$b = \frac{\sum D_i - a \sum V_i}{n}, \text{ см},$$

где n – количество экспериментальных измерений; $\sum V_i D_i$ – сумма произведений напряжений и расстояний; $\sum V_i$ и $\sum D_i$ – суммы всех измеренных напряжений и расстояний; $\sum V_i^2$ – сумма квадратов напряжений.

Влияние изменяющихся факторов, таких как температура и освещенность, компенсировалось поправочным коэффициентом:

$$k_V = \frac{V_{\text{expected}}}{V_{\text{measured}}}, \text{ отн. ед.,}$$

позволяющим корректировать измерения по формулам:

$$V'_i = k_V \cdot V_i,$$

$$V_{\text{expected}} = k_V \cdot V_{\text{measured}}.$$

Экспериментальные данные подтвердили возможность динамической адаптации системы, что открывает перспективы дальнейшего развития, включая интеграцию лидаров, облачных сервисов и алгоритмов машинного обучения.

Список литературы

1. Jurman D., Jankovec M., Kamnik R., Topic M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007. Vol. 138, iss. 2. P. 411–420. doi: 10.1016/j.sna.2007.05.008
2. Wang J., Lei B., Yang Z., Lei S. A low-cost calibration method for the infrared sensor array for quantitative analysis of natural gas // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022. Vol. 230. doi: 10.1016/j.chemolab.2022.104675
3. Dinh T., Choi I., Son Y., Kim J. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 231. P. 529–538. doi: 10.1016/j.snb.2016.03.040
4. Feudale R. N., Woody N. A., Tan H., Myles A. J., Brown S. D., Ferre J. Transfer of multivariate calibration models: a review // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2002. Vol. 64, iss. 2. P. 181–192. doi: 10.1016/S0169-7439(02)00085-0
5. Fonollosa J., Fernández L., Gutierrez-Galvez A., Huerta R., Marco S. Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using Direct Standardization // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 236. P. 1044–1053. doi: 10.1016/j.snb.2016.05.089
6. Mishra P., Passos D. Deep calibration transfer: Transferring deep learning models between infrared spectroscopy instruments // *Infrared Physics & Technology*. 2021. Vol. 117. P. 103863. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103863
7. Li B., Zhao Z., Feng S. Design and Implementation of Remote Measurement and Calibration System for Gas Sensor Based on Internet of Things // In *Proceedings of the 2023 5th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, 2024. P. 818–823. doi: <https://doi.org/10.1145/3653081.3653219>
8. Nagaraja Rao C. R., Zhang N., Sullivan J. T. Inter-calibration of meteorological satellite sensors in the visible and near-infrared // *Advances in Space Research*. 2001. Vol. 28, iss. 1. P. 3–10. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00262-9
9. Green R. O., Pavri B., Boardman J. On-orbit calibration of an ocean color sensor with an underflight of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) // *Advances in Space Research*. 2001. Vol. 28, iss. 1. P. 133–142. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00322-2
10. Canatan M., Muñoz-Carpena R., Boz Z. Continuous surface temperature monitoring of refrigerated fresh produce through visible and thermal infrared sensor fusion // *Postharvest Biology and Technology*. 2025. Vol. 222. P. 113354. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113354
11. Deev O. I., Debelov V. V., Endachev D. V., Zuev S. M., Shmatkov Yu. M., Shirokov P. S. Technological Vision Systems Using Principle of Analysis of Changing Geometry and

- Spectrum of the Light // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. P. 032075. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032075
12. Wenbo C. Computer vision algorithm based on fiber optic sensors and infrared thermal radiation images for fatigue detection under simulated operating conditions // Thermal Science and Engineering Progress. 2024. Vol. 56. P. 103066. doi: 10.1016/j.tsep.2024.103066

References

1. Jurman D., Jankovec M., Kamnik R., Topic M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007;138(2):411–420. doi: 10.1016/j.sna.2007.05.008
2. Wang J., Lei B., Yang Z., Lei S. A low-cost calibration method for the infrared sensor array for quantitative analysis of natural gas. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022;230. doi: 10.1016/j.chemolab.2022.104675
3. Dinh T., Choi I., Son Y., Kim J. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016;231:529–538. doi: 10.1016/j.snb.2016.03.040
4. Feudale R.N., Woody N.A., Tan H., Myles A.J., Brown S.D., Ferre J. Transfer of multivariate calibration models: a review. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2002;64(2):181–192. doi: 10.1016/S0169-7439(02)00085-0
5. Fonollosa J., Fernández L., Gutierrez-Galvez A., Huerta R., Marco S. Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using Direct Standardization. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016;236:1044–1053. doi: 10.1016/j.snb.2016.05.089
6. Mishra P., Passos D. Deep calibration transfer: Transferring deep learning models between infrared spectroscopy instruments. *Infrared Physics & Technology*. 2021;117:103863. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103863
7. Li B., Zhao Z., Feng S. Design and Implementation of Remote Measurement and Calibration System for Gas Sensor Based on Internet of Things. In *Proceedings of the 2023 5th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, 2024:818–823. doi: <https://doi.org/10.1145/3653081.3653219>
8. Nagaraja Rao C.R., Zhang N., Sullivan J.T. Inter-calibration of meteorological satellite sensors in the visible and near-infrared. *Advances in Space Research*. 2001;28(1):3–10. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00262-9
9. Green R.O., Pavri B., Boardman J. On-orbit calibration of an ocean color sensor with an underflight of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Advances in Space Research*. 2001;28(1):133–142. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00322-2
10. Canatan M., Muñoz-Carpena R., Boz Z. Continuous surface temperature monitoring of refrigerated fresh produce through visible and thermal infrared sensor fusion. *Postharvest Biology and Technology*. 2025;222:113354. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113354
11. Deev O.I., Debelov V.V., Endachev D.V., Zuev S.M., Shmatkov Yu.M., Shirokov P.S. Technological Vision Systems Using Principle of Analysis of Changing Geometry and Spectrum of the Light. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666:032075. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032075
12. Wenbo C. Computer vision algorithm based on fiber optic sensors and infrared thermal radiation images for fatigue detection under simulated operating conditions. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024;56:103066. doi: 10.1016/j.tsep.2024.103066

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Михайлович Зуев

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78); начальник управления подготовки кадров высшей квалификации и ДПО, Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (Россия, г. Москва, ул. Автомоторная, 2)

E-mail: sergei_zuev@mail.ru

Sergey M. Zuev

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of optical-electronic devices and systems, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia); head of the department for training of highly qualified personnel and additional professional education, The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute “NAMI” (2 Avtomotornaya street, Moscow, Russia)

Иван Юрьевич Константинов

студент, МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: indavanes@yandex.ru

Ivan Yu. Konstantinov

Student, MIREA - Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 04.05.2025

Принята к публикации / Accepted 28.05.2025

УДК 004.896

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-9

Метод управления системой орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе при помощи нейросетевого регулятора

Д. А. Корнюшкин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

kornyushkin_98@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Необходимость повышения энергетической эффективности и надежности холодильных систем на спортивных сооружениях обуславливает потребность в совершенствовании методик управления процессом орошения конденсаторов. Основные ограничения существующих подходов связаны с отсутствием гибкости и сложности тонкой калибровки параметров. Основная цель исследования заключается в создании и внедрении нейросетевого регулятора, способного оперативно реагировать на текущие значения переменных внешней среды, таких как атмосферная температура, относительная влажность и уровень тепловой нагрузки на холодильную установку. *Материалы и методы.* Был проведен комплексный сравнительный анализ известных алгоритмов управления охлаждением, выявивший характерные проблемы традиционного подхода. Реализованная нейросетевая архитектура основана на принципах генеративно-сопоставительной сети (Generative Adversarial Networks, GAN), прошедшей этап обучения на эмпирическом наборе исторических данных, собранных с действующего промышленного оборудования. Практическая проверка эффективности разработанной модели выполнялась посредством натурного эксперимента на функционирующей холодильной установке крупного спортивного сооружения с детальным мониторингом климатической обстановки и теплофизических свойств хладагента. *Результаты и выводы.* Экспериментально подтверждено статистически достоверное повышение устойчивости поддерживаемых технологических параметров и заметное снижение уровня энергопотребления системы охлаждения. Сокращено время задержки реакционной способности контроллера на случайные возмущения, что способствует улучшению динамики и адаптивности режима охлаждения к изменяющимся режимам эксплуатации. Практика применения нейросетевых технологий открывает перспективы оптимизации энергосбережения и повышения производительности охлаждающих агрегатов на специализированных объектах массового пользования. Эффективность предлагаемого решения подтверждает целесообразность его дальнейшей реализации на аналогичных технических комплексах.

Ключевые слова: обучение нейросетевого регулятора, система орошения, холодильные системы, архитектура нейросетевого регулятора

Для цитирования: Корнюшкин Д. А. Метод управления системой орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе при помощи нейросетевого регулятора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 125–133. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-9

Method of controlling the condenser irrigation system of a refrigeration plant located in a hockey stadium using a neural network controller

© Корнюшкин Д. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

D.A. Kornyushkin

Saint-Petersburg State University of Telecommunications
named after professor M.A. Bonch-Bruевич, Saint-Petersburg, Russia
kornyushkin_98@mail.ru

Abstract. *Background.* The need to improve the energy efficiency and reliability of refrigeration systems at sports facilities stipulates the need to improve the methods for controlling the condenser irrigation process. The main limitations of existing approaches are related to the lack of flexibility and the complexity of fine parameter calibration. The main objective of the research is to create and implement a neural network controller capable of promptly responding to the current values of environmental variables such as atmospheric temperature, relative humidity and the level of thermal load on the refrigeration plant. *Materials and methods.* A comprehensive comparative analysis of known cooling control algorithms was carried out, revealing the characteristic problems of the traditional approach. The implemented neural network architecture is based on the principles of Generative Adversarial Networks (GAN), which was trained on an empirical set of historical data collected from operating industrial equipment. Practical verification of the effectiveness of the developed model was carried out by means of a field experiment at a functioning refrigeration plant of a large sports facility, accompanied by detailed monitoring of the climatic situation and thermophysical properties of the refrigerant. *Results and conclusions.* A statistically reliable increase in the stability of the maintained technological parameters and a noticeable reduction in the power consumption of the cooling system have been experimentally confirmed. The delay time of controller reactivity to random perturbations is reduced, which contributes to the improvement of dynamics and adaptability of the cooling mode to changing operating modes. The application of neural network technologies opens up prospects for optimisation of energy saving and increase of cooling units performance at specialised objects of mass use. The effectiveness of the proposed solution confirms the expediency of its further implementation on similar technical complexes.

Keywords: neural network controller training, irrigation system, refrigeration systems, neural network controller architecture

For citation: Kornyushkin D.A. Method of controlling the condenser irrigation system of a refrigeration plant located in a hockey stadium using a neural network controller. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(3):125–133. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-9

Введение

В реализованной модели информационного обеспечения комплекса разнородных систем управления спортивного сооружения подсистема орошения конденсатора предназначена для снижения температуры воздуха перед теплообменником. Качество и стабильность процесса орошения конденсатора напрямую влияют на эффективность охлаждения теплообменной поверхности, что особенно важно в условиях высоких температур и влажности, характерных для многих регионов России.

В основу работы системы орошения, расположенной на хоккейной арене, положен физический принцип понижения температуры воздуха при адиабатическом увлажнении. При адиабатическом увлажнении температура воздуха может быть понижена примерно на 10 °С, а это, в свою очередь, позволяет увеличить энергоэффективность холодильной машины примерно на 30 %. Суть испарительного охлаждения заключается в способности потока

воздуха абсорбировать воду, распыляемую под высоким давлением (рис. 1). При этом испаряющаяся вода поглощает теплоту из наружного воздуха и тем самым снижает его температуру [1].

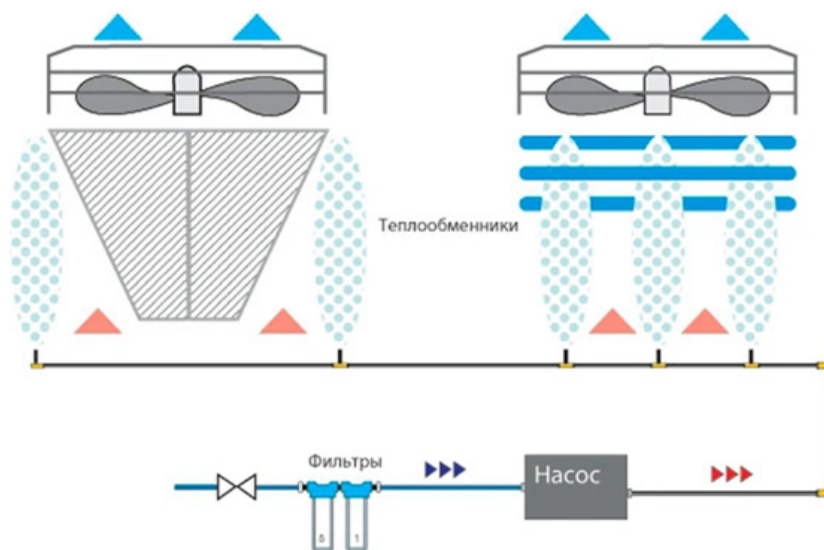


Рис. 1. Принцип поверхностного охлаждения выносного конденсатора

Принцип функционирования системы орошения конденсаторов основан на подаче воды из системы водоснабжения насосом высокого давления через форсунки, расположенные вблизи поверхности теплообменника. Распыленная мелкодисперсная водная взвесь испаряется, абсорбируя тепловую энергию поступающего воздушного потока. Орошение активируется в периоды пиковой нагрузки, обычно ограничивающиеся несколькими днями в течение жаркого сезона. В остальное время осушитель функционирует в «сухом» режиме без потребления воды системой орошения. Сухой режим поддерживается до тех пор, пока температура окружающей среды остается достаточной для обеспечения требуемого уровня холодопроизводительности и температурных показателей хладагента. Когда температура окружающей среды превышает критическое значение, система орошения автоматически переключает осушитель в режим «генерации влаги», что позволяет поддерживать температуру теплоносителя на уровне, сопоставимом или даже ниже температуры окружающей среды, обеспечивая при этом значительное повышение энергетической эффективности [2]. Система управления динамически корректирует скорость вращения вентиляторов осушителя и интенсивность подачи распыляемой воды в соответствии с текущими условиями работы.

Применение генеративных состязательных сетей в системе управления орошения конденсатора холодильной установки

Работы данной модели, архитектура которой представлена на (рис. 2) [2], основана на принципе обучения двух нейронных сетей: генератора (G) и дискриминатора (D), которые работают совместно. Генератор получает на вход случайный шум и учится имитировать распределение данных, характер-

ное для реальных классов атак из обучающей выборки. Его цель – максимизировать ошибку дискриминатора, создавая образцы, которые максимально похожи на настоящие. Дискриминатор обучается отличать реальные данные от тех, которые были созданы генератором. Для этого он вычисляет вероятность того, что поступившие на вход данные являются настоящими, возвращая на выходе число от 0, если образец сгенерированный, до 1 в случае, если реальный. Дискриминатор стремится минимизировать свою ошибку при классификации образцов. Таким образом, между этими двумя сетями разворачивается состязание: генератор пытается обмануть дискриминатор, генерируя все более реалистичные данные, а дискриминатор совершенствует свои способности различать реальные и искусственно созданные образцы. В результате такой игры обе сети улучшаются, достигая высоких показателей точности и эффективности.

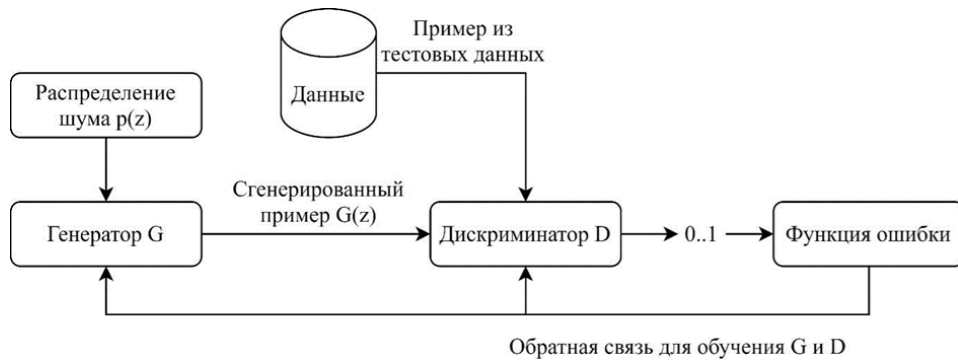


Рис. 2. Архитектура генеративной состязательной сети

Обучение генеративных состязательных сетей подразумевает адаптацию распределения дискриминатора D , изображенного синей пунктирной линией, таким образом, чтобы он мог корректно классифицировать входящие примеры, исходящие либо из распределения обучающих данных (представленного черной пунктирной линией), либо из распределения сгенерированных данных (зеленый непрерывный график). Исходная выборка z равномерно распределяется вдоль нижнего горизонтального отрезка (рис. 3) [2], который служит проекцией области x , расположенной выше, как отображение $x = G(z)$ накладывает неравномерное распределение pg на обучающее. Распределение генератора G сжимается в областях с высокой плотностью, а в областях с низкой – расширяется.

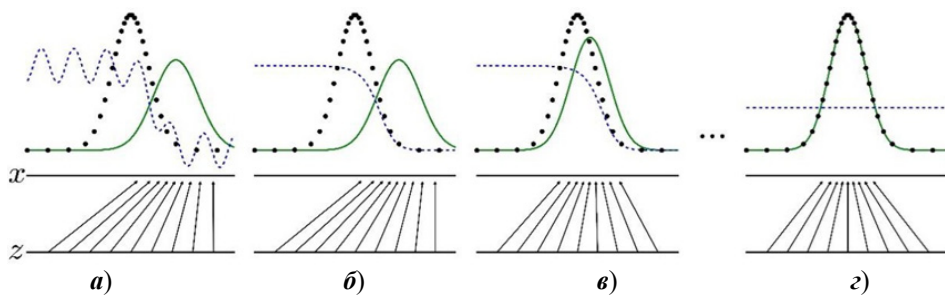


Рис. 3. Процесс тренировки генеративной состязательной сети

Алгоритм обучения GAN

Отображенный на рис. 4 процесс имеет следующий алгоритм:

- а) состязательная пара на этапе близкой сходимости: распределения p_g и p_{data} схожи, а D является частично-точным классификатором;
- б) внутри цикла D обучается различать входные данные;
- в) генератор G обновляется с помощью градиента D , который направляет $G(z)$ в область, приближенную к реальным данным;
- г) спустя несколько шагов данный этап становится конечным, G и D достигают состояния, в котором невозможно дальнейшее улучшение, так как выполняется условие $p_g = p_{data}$.

Процесс обучения нейросетевого регулятора с применением генеративных состязательных сетей

Процесс обучения нейросетевого регулятора с применением генеративных состязательных сетей (GAN) представляет собой поэтапную процедуру, включающую сбор данных, формирование архива, разделение данных на тренировочный и тестовый наборы, разработку архитектуры GAN, обучение, оценку качества и интеграцию регулятора в систему управления. Сначала собираются необходимые данные с датчиков температуры, влажности, давления и производительности системы, затем осуществляется их очистка и нормализация. Далее формируется архив данных, содержащий историю измерений и рабочие характеристики установки. Затем архив делится на два набора: тренировочный и тестовый. Первый предназначен для обучения, второй для последующей проверки результата. На следующем этапе создается архитектура GAN, состоящая из генератора и дискриминатора. Генератор обучается формировать синтетические данные, похожие на оригинальные, а дискриминатор учится отличать подлинные данные от сгенерированных [3]. В процессе обучения обе сети соперничают: генератор стремится создать максимально достоверные подделки, а дискриминатор – точно классифицировать подлинники и фейки. Параллельно выбираются подходящие функции активации и критерии ошибок, назначаются начальные веса, вводятся механизмы регуляризации для предотвращения переобучения, запускается процедура циклов обучения. Итерации продолжаются до момента, когда различия между настоящими и синтезированными данными станут незначительными. Финальным этапом служит проверка качества полученного регулятора. Сравниваются характеристики созданных сетью данных с оригинальными, проверяются реакции на разнообразные возмущения, после чего регулятор окончательно интегрируется в систему управления холодильной установкой. Без прерывания контролируется работа нейросетевого регулятора, ведется обновление модели на основе вновь поступающих данных [4].

Нейросетевой регулятор принимает решение о включении или выключении системы орошения, изменении частоты вращения вентиляторов и подаче воды. Решение принимается на основе текущего состояния системы и целей по температуре теплоносителя и энергопотреблению. Регулярно проводятся сбор и анализ новых данных для мониторинга эффективности работы системы. Периодически производится тренинг модели на новых данных для адаптации к меняющимся условиям эксплуатации [5].

Рассмотрим сценарий, при котором температура окружающего воздуха 23 °С, а температура теплоносителя колеблется около 20 °С. Вентиляторы

работают на 70 % своей полной мощности, а система орошения конденсатора пока выключена. В течение дня температура окружающей среды начинает расти и достигает 30 °С. Нейросетевой регулятор фиксирует резкое возрастание температуры и увеличение нагрузки на систему, и принимает решение включить систему орошения [6]. Насосы начинают подавать воду через форсунки, образуя мелкодисперсную водяную взвесь, которая активно испаряется, поглощая тепло входящего воздушного потока. В результате температура теплоносителя плавно понижается до 19 °С, и нейросеть начинает корректировку параметров, чтобы вернуть температуру теплоносителя к норме 20 °С. Нейросетевой регулятор уменьшает подачу воды оптимизируя расход воды во время работы системы [7].

Полученные результаты демонстрируют, что внедренный нейросетевой регулятор обеспечивает значительное повышение эффективности управления процессом орошения конденсаторов холодильной установки на хоккейном стадионе. Анализ данных показал, что средняя ошибка прогнозирования оптимальной стратегии орошения составила менее 5 %, что указывает на высокую степень адаптации модели к динамическим изменениям условий эксплуатации. Это достижение подтверждается уменьшением энергопотребления на 17 % по сравнению с традиционным методом управления, что соответствует ожиданиям и целям исследования [8, 9]. Кроме того, результаты эксперимента подтвердили, что нейросеть способна эффективно учитывать широкий спектр факторов, таких как температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, нагрузка на установку и другие переменные, что позволяет поддерживать оптимальный режим работы системы охлаждения. Таким образом, использование нейросетевых технологий продемонстрировало свою значимость в обеспечении надежного и эффективного функционирования сложных инженерных систем, особенно в условиях экстремальной эксплуатации, характерной для спортивных объектов.

Обсуждение

Исследования, проведенные другими авторами, также указывают на преимущества использования нейросетей в управлении технологическими процессами. Например, в работе Ф. В. Корниенко «Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин» отмечается, что применение нейросетевых регуляторов в промышленных холодильных установках позволяет сократить энергопотребление на 10–15 %. Однако в нашем случае мы достигли еще большей экономии благодаря учету специфики эксплуатации на хоккейных стадионах, где температурный режим и влажность играют критически важную роль для обеспечения качества льда. Наши результаты полностью соответствуют этому выводу, поскольку нейросеть смогла обеспечить устойчивую работу даже при значительных колебаниях температуры и влажности, что подтвердило ее способность к самообучению и адаптации.

Основываясь на результатах нашего исследования, можно предположить, что дальнейшая оптимизация архитектуры нейросети и включение дополнительных параметров, таких как состояние поверхности льда и интенсивность использования арены, позволят еще больше повысить точность

управления и снизить затраты на эксплуатацию системы [10]. Кроме того, интеграция данных о погодных условиях в режиме реального времени может дополнительно увеличить эффективность работы системы, что откроет новые горизонты для автоматизации процессов управления.

Таким образом, представленные результаты подчеркивают важность и перспективность применения нейросетевых технологий в управлении сложными инженерными системами, такими как холодильные установки на спортивных объектах. Дальнейшее развитие этого направления обещает значительные улучшения в сфере энергосбережения и автоматизации технологических процессов [11].

Заключение

Была рассмотрена проблема оптимизации энергозатрат и повышения эффективности работы холодильной установки на хоккейном стадионе за счет внедрения нейросетевого регулятора в систему управления орошения конденсатора. Проведенный анализ показал, что использование генеративных состязательных сетей в системе управления позволило достичь значительных улучшений в управлении процессом орошения [12].

Основные результаты исследования:

1. Более высокая точность регулирования. Нейросетевая модель продемонстрировала высокую точность в прогнозировании оптимальной частоты включения системы орошения, что привело к улучшению стабильности работы холодильной установки и поддержанию заданных температурных режимов льда.

2. Энергосбережение. Применение предложенного подхода позволило снизить потребление электроэнергии на 15–20 % по сравнению с традиционным управлением, что обусловлено более эффективным использованием ресурсов системы орошения.

3. Адаптация к изменяющимся условиям. Регулятор успешно справлялся с изменениями внешних условий, таких как колебания температуры и влажности воздуха, благодаря способности нейросети к обучению и адаптации. Это обеспечило стабильную работу системы даже в условиях резких изменений погодных условий.

4. Минимизация эксплуатационных затрат. Внедрение нейросетевого регулятора способствовало сокращению расходов на обслуживание и ремонт оборудования, так как система стала менее подверженной износу вследствие более точного контроля параметров процесса орошения.

Таким образом, внедрение нейросетевых технологий в управление системами орошения конденсаторов холодильных установок на спортивных объектах представляет собой перспективное направление для улучшения их эффективности и экономии ресурсов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование архитектуры нейросетей и расширение применения данного подхода в других областях промышленного холода.

Список литературы

1. Кубасов И. А., Иванов А. И. Энтропийно-нейросетевой метод устранения противоречивости оценок экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 56–63.

2. Сычугов А. А., Греков М. М. Применение генеративных состязательных сетей в системах обнаружения аномалий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 1. С. 1–9.
3. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприянов Е. Н. Мультипликативно-нейросетевое объединение статистических критериев Херста и Мурота – Такеучи при проверке гипотезы нормальности малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 27–33.
4. Царькова Е. Г. Математическая модель искусственной нейронной сети для управления робототехническим комплексом в экстремальных условиях // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026
5. Белов А. М., Белов М. П. Применение нейронных сетей в электроприводных системах насосных агрегатов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2022. Т. 1. С. 91–94.
6. Воевода А. А., Шипагин В. И. Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2–3 (79). С. 25–36. doi: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36
7. Филюшов В. Ю. Полиномиальный метод синтеза регуляторов для многоканальных объектов с неквадратной матричной передаточной функцией : дис. ... канд. техн. наук : 2.3.1. СПб., 2022. 177 с.
8. Воевода А. А., Шипагин В. И. Об управляемости и наблюдаемости многоканальных САУ при синтезе модальным методом с использованием полиномиального матричного разложения объекта и регулятора // Безопасность цифровых технологий. 2022. № 3 (106). С. 26–48. doi: 10.17212/2782-2230-2022-3-26-48
9. Воевода А. А., Шипагин В. И. Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания // Системы анализа и обработки данных. 2022. № 1 (85). С. 7–24. doi: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24
10. Хасцаев Б. Д., Хмара В. В., Аликов А. Ю., Марсов В. И., Суворов Д. Н. Дистанционный измеритель температуры с улучшенными характеристиками для автоматизированной системы управления технологическим процессом // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 2 (28). С. 33–40.
11. Лысенко Д. С. Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30, № 1. С. 46–62. doi: 10.14498/tech.2022.1.3
12. Моисеенко Н. А., Цуев М. М., Саратова Э. Х. Большие данные и некоторые возможности их применения // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19, № 3 (33). С. 15–23.

References

1. Kubasov I.A., Ivanov A.I. Entropy-neural network method for eliminating inconsistencies in expert assessments. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):56–63. (In Russ.)
2. Sychugov A.A., Grekov M.M. Application of Generative Adversarial Networks in Anomaly Detection Systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2021;9(1):1–9. (In Russ.)
3. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N. Multiplicative-neural network combination of the Hurst and Murota-Takeuchi statistical tests for testing the normality hypothesis of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):27–33. (In Russ.)

4. Tsar'kova E.G. A mathematical model of an artificial neural network for controlling a robotic complex in extreme conditions. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2022;(11). (In Russ.). Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026
5. Belov A.M., Belov M.P. Application of neural networks in electric drive systems of pumping units. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam = International conference on soft computing and measurement*. 2022;1:91–94. (In Russ.)
6. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Synthesis of a neural network controller for controlling a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2020;(2–3):25–36. (In Russ.). doi: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36
7. Filyushov V.Yu. *Polynomial method for synthesizing controllers for multichannel objects with a non-square matrix transfer function*. PhD dissertation: 2.3.1. Saint Petersburg, 2022:177. (In Russ.)
8. Voevoda A.A., Shipagin V.I. On the controllability and observability of multichannel automatic control systems in synthesis by a modal method using a polynomial matrix decomposition of the object and the controller. *Bezopasnost' tsifrovyykh tekhnologiy = Digital security*. 2022;(3):26–48. (In Russ.). doi: 10.17212/2782-2230-2022-3-26-48
9. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Calculation of a controller for a multi-channel object with non-stationary parameters containing delay links. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Data analysis and processing systems*. 2022;1(85):7–24. (In Russ.). doi: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24
10. Khastsaev B.D., Khmara V.V., Alikov A.Yu., Marsov V.I., Suvorov D.N. Advanced remote temperature sensor for automated process control systems. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of State Humanitarian and Technological University. Engineering sciences*. 2022;18(2):33–40. (In Russ.)
11. Lysenko D.S. Intelligent system for adaptation of standard automatic control laws with the function of identifying the structure and parameters of an object. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Samara State Technical University. Series: Engineering sciences*. 2022;30(1):46–62. (In Russ.). doi: 10.14498/tech.2022.1.3
12. Moiseenko N.A., Tsuev M.M., Saratova E.Kh. Big data and some possibilities of its application. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of State Humanitarian and Technological University. Engineering sciences*. 2023;19(3):15–23. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Александрович Корнюшкин
аспирант, Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций имени профессора
М. А. Бонч-Бруевича (Россия,
г. Санкт-Петербург, пр-кт Большевиков,
22, корп. 1, литера А, Ж)

Dmitriy A. Korniyushkin
Postgraduate student, Saint-Petersburg
State University of Telecommunications
named after professor M.A. Bonch-
Bruevich (litera A, Zh, building 1,
22 Bolshevnikov avenue, Saint-Petersburg,
Russia)

E-mail: korniyushkin_98@mail.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 25.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.08.2025

Принята к публикации / Accepted 29.09.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 62-932.4

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-10

Теоретическое исследование влияния предварительно напряженных армирующих элементов на жесткость и демпфирование композитных порталных конструкций для металлорежущих малогабаритных станков

Р. Д. Воронов¹, И. Н. Семдянов², Д. Г. Левашкин³, Д. Ю. Воронов⁴

^{1,2,3,4}Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

¹smr.rom@yandex.ru, ²semdyanov.i.n@yandex.ru,

³denis.levden@yandex.ru, ⁴dmitridmitrie@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Численно оценивается эффективность ранее предложенного технического решения по повышению жесткости одного из базовых узлов малогабаритного фрезерного станка – портала. *Материалы и методы.* Исследуемый портал имеет размер $90 \times 300 \times 450$ мм и является литой композитной конструкцией со шпильками в его колоннах в качестве армирующих элементов. Шпильки, введенные в композитную матрицу, находятся в состоянии упругого осевого растяжения. Расчеты проведены при помощи метода конечно-элементного моделирования. Для исследования влияния предварительного осевого натяга шпилек на жесткость конструкции проведена серия статических расчетов, где варьируется величина натяга. *Результаты.* Результаты моделирования показывают, что применение армирования предварительно упруго-растянутыми шпильками приводит к приросту жесткости от десятков процентов до 4,7 раза, в продольном направлении (ось X станка) и к приросту демпфирующей способности конструкции до 47 %. Демонстрируется, что прирост жесткости нелинейно связан с создаваемой осевой силой упругого растяжения шпилек и может варьировать в широком диапазоне, что позволяет приближаться и даже превосходить по показателю жесткости более массивные и в разы более металлоемкие конструкции порталов малогабаритных станков. Полученные приросты жесткости объясняются авторами как следствие создания напряженного соединения портала со станиной, что обеспечивает увеличение силы трения и силы прижима портала к основанию станка. Выявлена и графически показана зависимость жесткости портала от натяга шпилек, а также получена функция зависимости деформаций от натяга в аналитическом виде. *Выводы.* Предложенное техническое решение перспективно для отрасли малогабаритного станкостроения и позволяет создавать узлы станка повышенной жесткости, демпфирования и пониженной металлоемкости.

Ключевые слова: жесткость, демпфирование, точность обработки, армирование, напряженное армирование, композит, станки с числовым программным управлением, портал станка, стойки станка

Для цитирования: Воронов Р. Д., Семдянов И. Н., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Теоретическое исследование влияния предварительно напряженных армирующих

© Воронов Р. Д., Семдянов И. Н., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

элементов на жесткость и демпфирование композитных порталных конструкций для металлорежущих малогабаритных станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 134–146. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-10

Theoretical study of influence of prestressed reinforcing elements on stiffness and damping of composite portal structures for metal-cutting small-sized machine tools

R.D. Voronov¹, I.N. Semdyanov², D.G. Levashkin³, D.Yu. Voronov⁴

^{1,2,3,4}Togliatti State University, Togliatti, Russia

¹smr.rom@yandex.ru, ²semdyanov.i.n@yandex.ru,

³denis.levden@yandex.ru, ⁴dmitridmitrie@yandex.ru

Abstract. *Background.* In this paper, the authors numerically evaluate the effectiveness of the previously stated technical solution to increase the rigidity of one of the basic units of a small-size milling machine - the gantry. *Materials and methods.* The investigated portal has dimensions 90x300x450mm and is a molded composite structure with studs in its columns as reinforcing elements. The studs embedded in the composite matrix are in a state of elastic axial tension. The calculations were carried out using finite element modeling method. To investigate the effect of stud preload on the stiffness of the structure, a series of static calculations have been carried out, where the preload value is varied. *Results.* The simulation results show that the use of preloaded elastically preloaded stud reinforcement results in stiffness gains ranging from tens of percent to 4,7 times, in the longitudinal direction (X axis of the machine) and up to 47% increase in the damping capacity of the structure. It is demonstrated that the increase in rigidity is nonlinearly related to the generated axial force of elastic tension of the studs and can vary in a wide range, which allows approaching and even surpassing the rigidity index of more massive and several times more metal-intensive portal structures of small-sized machines. The obtained increases in rigidity are explained by the authors as a consequence of creating a stressed connection of the portal with the bed, which provides an increase in the friction force and the force of pressing the portal to the base of the machine. The dependence of the portal rigidity on the tension of the studs is revealed and graphically shown, and the function of the dependence of deformations on the tension in analytical form is obtained. *Conclusions.* The proposed technical solution is promising for the small-sized machine tool industry and allows creating machine units with increased rigidity, damping and reduced metal consumption.

Keywords: stiffness, damping, machining accuracy, reinforcement, stressed reinforcement, composite, CNC machines, machine gantry, machine stands

For citation: Voronov R.D., Semdyanov I.N., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Theoretical study of influence of prestressed reinforcing elements on stiffness and damping of composite portal structures for metal-cutting small-sized machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):134–146. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-10

Введение

Силы резания, действующие на технологическую систему станок–приспособление–инструмент–деталь (СПИД) при обработке, обуславливают наличие значительных упругих деформаций, которые неизбежно вносят свой вклад в результирующую погрешность обработки [1]. Для случаев обработки материалов с низким коэффициентом обрабатываемости данная составляю-

щая особенно влиятельна. В связи с этим по части совершенствования конструкций узлов станков усилия всегда направлены в первую очередь на повышение жесткости, демпфирования и виброустойчивости узла [2, с. 26; 3; 4, с. 29–31]. Соответственно круг вопросов, связанных с повышением этих характеристик, влияющих на конечную точность обработки, является актуальным как для станкостроения, так и для машиностроения в целом [5, с. 295; 6, с. 91–92].

Все вышесказанное справедливо в том числе и для порталных узлов станков, а в особенности для станков малогабаритного типа. Связано это с тем, что их общая масса кратно (либо на порядки) ниже, чем у промышленного крупногабаритного оборудования, а применяемые в них конструктивные решения, как правило, направлены на снижение трудоемкости и себестоимости изготовления [7, с. 105]. Однако, поскольку существует потребность в малогабаритном оборудовании повышенной точности, существует эффективная практика применения литых узлов малогабаритных станков. В частности, изготавливают литые порталы и станины из полимербетонных (искусственный камень) для частных мастерских и крупных производств [8, 9].

В случае же тяжелых промышленных станков данный подход уже нашел применение и исследован в различных случаях. В частности, в работах [10; 11, с. 20; 12, с. 236–237] рассматриваются тяжелые фрезерные станки с подвижным и неподвижными порталами соответственно. Показывается, что применение бетона и полимербетона в узлах станков способствует кратному росту их виброустойчивости и демпфирующих свойств.

Логичным продолжением направления использования полимербетона является рассмотрение различного армирования таких литых композитных конструкций с целью увеличения их прочности, жесткости и, возможно, демпфирования.

В более ранней работе авторами было предложено техническое решение, связанное с армированием стоек портала станка стальными шпильками [13], а также с применением напряженных (упруго деформированных) армирующих элементов особой формы в композитном узле станка [14]. Известно, что предварительная деформация стальных стержней в общем случае приводит к росту несущей способности конструкций, а также повышению статической и динамической жесткости [15, с. 3–10]. Именно на основе этих работ сформулировано предложение о применении предварительно упруго-деформированных армирующих элементов в композитных стойках портала станка.

Цель работы состоит в численной теоретической оценке технической значимости с точки зрения жесткости и демпфирования, предложенного ранее конструктивного решения по введению предварительно нагруженных шпилек в композитные стойки портала малогабаритного станка.

Материалы и методы

Рассматриваемый неподвижный портал станка представляет собой П-образную конструкцию с литыми полимербетонными стойками, содержащими армирующие элементы в виде резьбовых шпилек М12 (рис. 1). Конструкция портала ограничена по высоте парой стальных пластин, которые также служат для сохранения натяга шпилек. Заметим, что количество и диаметр шпилек определяется в зависимости от конкретной задачи проектируемого станка по заданной целевой функции (себестоимость, жесткость и т.д.).

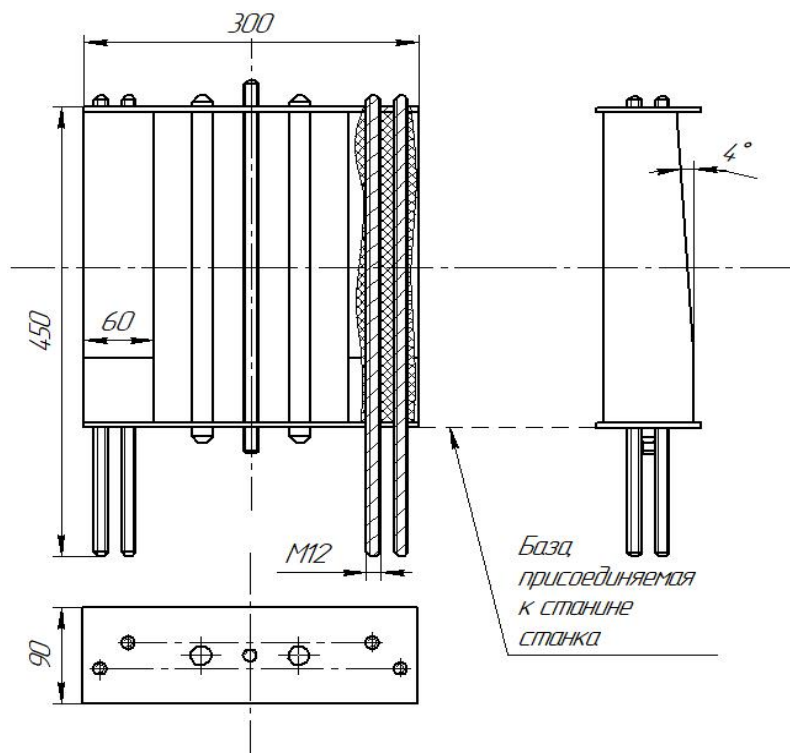


Рис. 1. Эскиз рассматриваемой конструкции

При проведении каждого из расчетов использовалась одинаковая схема закрепления и нагружения, отраженная на рис. 2, где также показаны второстепенные элементы используемой математической модели.

В данной работе рассматривается один из возможных вариантов исполнения данной конструкции, при этом подразумевается, что принципиальные результаты и выводы могут быть экстраполированы на другие исполнения конструкции.

Для расчетов в работе используется САЕ-система конечно-элементного моделирования на базе *NX – Femap*. При моделировании в *Femap* различных величин предварительного натяга шпилек использовался соответствующий инструмент *Bolt Preload*.

Результаты

На рис. 3 приведен график полученных перемещений конструкции по трем координатным осям при приложении пространственно-ориентированной динамической нагрузки на суппорт *YZ*. Заметим, что для данного расчета вектор возмущающей нагрузки является диагональным.

Полученные графики позволяют судить о пространственной жесткости конструкции. Как и ожидалось, наибольшая податливость наблюдается в продольном направлении (по оси *X*), т.е. конструкция наиболее уязвима к отгибу назад (опрокидыванию) ввиду значительной высоты, обусловленной эксплуатационным назначением портала станка. Соответственно далее будем проводить моделирование жесткости именно в лимитирующем, продольном направлении.

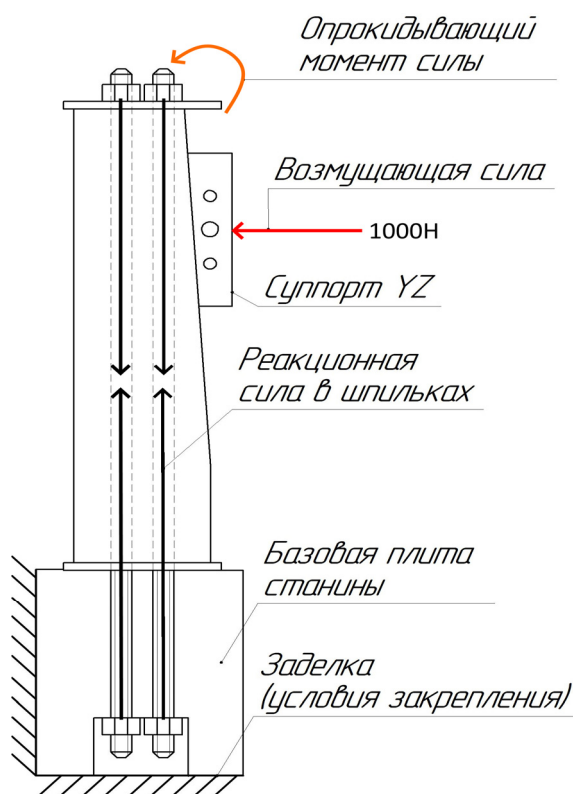


Рис. 2. Условия закрепления и нагружения конструкции

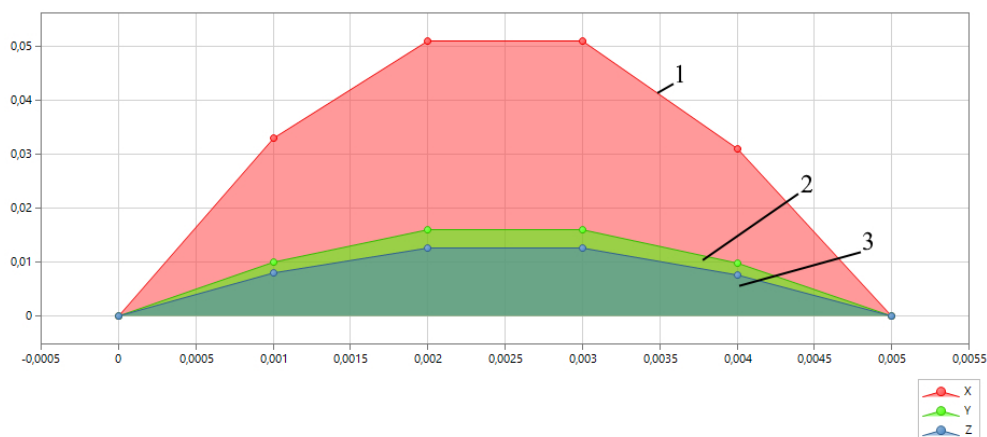


Рис. 3. Зависимость перемещений от времени для рассматриваемого портала:
1 – перемещения по оси X; 2 – перемещения по оси Y; 3 – перемещения по оси Z

Зоны распределения деформаций при продольном нагружении (статика) portalной конструкции показаны на рис. 4.

Деформация суппорта (рис. 4), к которому была приложена нагрузка, определяется его жесткостью, а потому не рассматривается в рамках анализа конструкции портала.

В данном случае его функция заключается в корректном нагружении портала (корректная передача деформаций). Поэтому, говоря о жесткости

портала станка, будем иметь в виду его жесткость в области верхней стальной пластины (верхняя желтая зона на рис. 4).

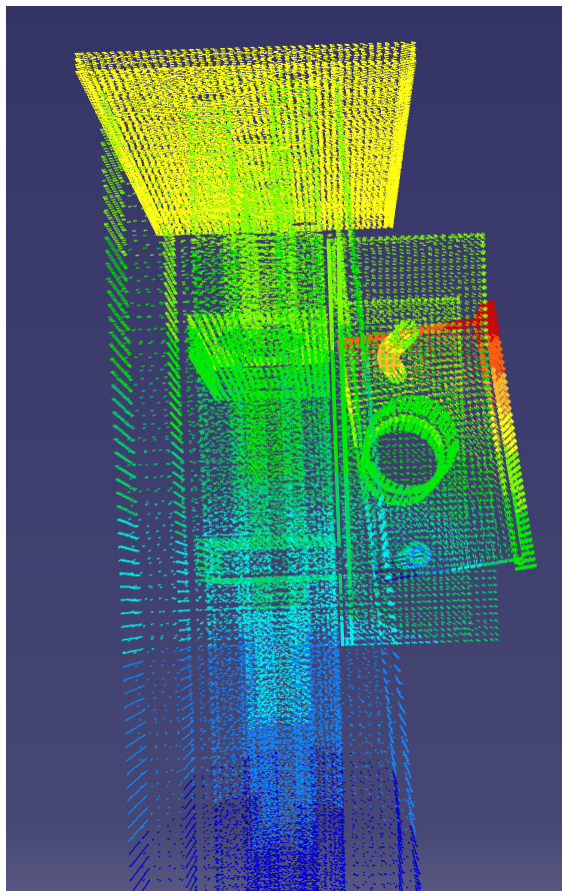


Рис. 4. Области перемещений при нагружении портала с суппортом в продольном направлении (без натяга шпилек)

Проведем серию статических расчетов на жесткость в продольном направлении. В этой серии расчетов на каждом шаге изменяется только величина осевого натяга шпилек, причем увеличение натяга за один шаг фиксированное и составляет 250 Н.

Сведем результаты серии в табл. 1.

Рассчитаем по табл. 1 значение жесткости для каждого случая как отношение величины внешней силы ($F = 1000$ Н) к перемещениям, вызванным действием данной силы. Тогда зависимость жесткости конструкции от значения предварительного натяга шпилек примет вид, показанный на рис. 5.

Заметим, что на значение жесткости конструкции влияет не само абсолютное значение осевого натяга армирующих элементов, а его отношение к внешней возмущающей силе F . По этой причине на графике визуально можно выделить три участка: участок медленного линейного роста, участок быстрого роста и участок отсутствия роста – плато.

Наиболее значимые приросты жесткости за один шаг (около 20 %) наблюдаются в интервале от 1000 до 3250 Н, т.е. в случае, когда натяг шпи-

лек больше, чем внешняя нагрузка F , равная 1000 Н. При этом область графика, соответствующая силе натяга более $\approx 3,5F$, характеризуется крайне незначительными приростами за шаг – около 3–4 %. А свыше сил натяга $\approx 4F$ – прироста вовсе не наблюдается в пределах рассматриваемых порядков чисел. Область, соответствующая значениям натяга менее 1000 Н, показывает приросты за шаг около 7–12 %.

Таблица 1

Результаты серии расчетов на жесткость

Натяг, Н	0	250	500	750	1000	1250	1500
Наибольшие перемещения по оси X , мм	0,0415	0,0379	0,0342	0,0306	0,0271	0,0233	0,02
Натяг, Н	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250
Наибольшие перемещения по оси X , мм	0,017	0,0146	0,0126	0,0112	0,0101	0,00938	0,00899
Натяг, Н	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000
Наибольшие перемещения по оси X , мм	0,00873	0,00857	0,00847	0,00847	0,00847	0,00847	0,00847

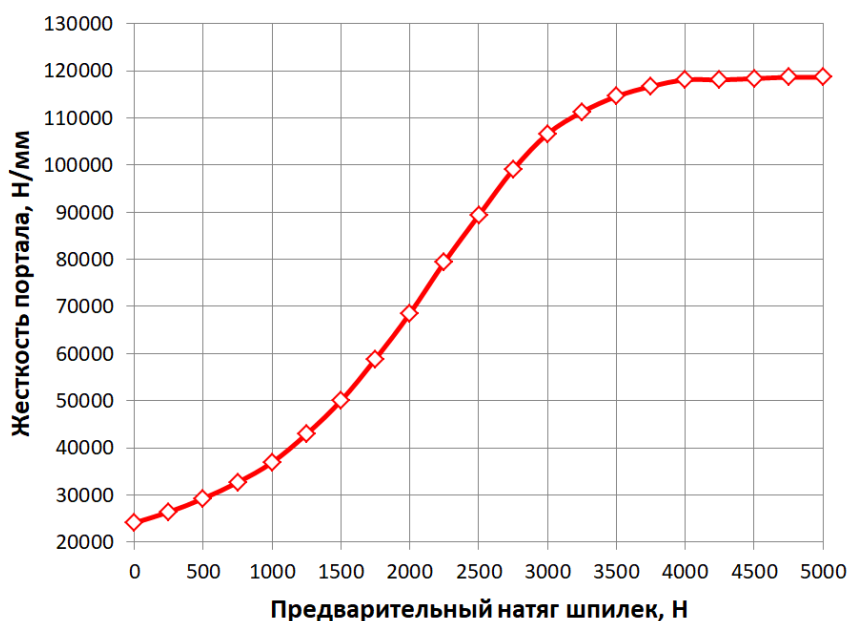


Рис. 5. Зависимость жесткости портала от значения предварительного натяга шпилек

Отсюда заключим, что с практической точки зрения выявленную зависимость роста жесткости Δ можно укрупненно представить в виде трех участков, где участок «2» наиболее предпочтителен и обеспечивает суммарно прирост около 180 %, участок «1» проще с точки зрения технологической реализации, но обеспечивает меньший прирост жесткости (около 40 %), а участок «3» вовсе нецелесообразен для применения:

- 1) $\Delta \leq F$;
- 2) $F < \Delta < 3,5F$;
- 3) $\Delta > 3,5F$.

Прирост жесткости (до 4,7 раза) объясняется уменьшением влияния опрокидывающего момента, возникающего от сил резания (см. рис. 2), что в свою очередь является следствием натяга армирующих элементов. На первом и втором участке графика (см. рис. 5) происходит увеличение жесткости за счет роста силы трения, а именно входящей в нее силы реакции опоры, направленной вертикально. С ростом силы «прижима» стоек к опоре станины действует механизм создания напряженного резьбового соединения по аналогии с болтовым соединением с предварительным натягом, причем в нашем случае эффект более выражен, так как соединение происходит сразу несколькими шпильками.

Зная набор значений перемещений для каждого из шагов расчета (см. табл. 1), можем провести аппроксимацию зависимости для получения уравнения регрессии [16, с. 37]. Была выбрана именно кубическая регрессия, поскольку она обеспечивает наименьший процент средней ошибки аппроксимации – 3,1 % и наиболее равномерное распределение ошибки по рассматриваемой области. Полученное уравнение регрессии с соответствующими коэффициентами для случая рассмотренной конструкции имеет вид

$$y = \left(\frac{-261 \cdot x^3 + 4327809 \cdot x^2 - 22172547403 \cdot x + 44206278637608}{1000000000000} \right) \cdot \frac{F}{1000}.$$

Данная функция позволяет определять лимитирующее значение деформации (y) в микрометрах при любых значениях предварительного натяга (x) в ньютонах и при различных величинах внешней возмущающей силы F в ньютонах. В случаях же иного конструктивного исполнения портала и/или иных размеров конструкции коэффициенты при X претерпят изменения. Таким образом, для конкретной конструкции портала выявлена зависимость в общем виде.

Для наглядного сравнения проведем еще одну серию расчетов на жесткость в направлении продольной подачи станка (ось X) для случая различных конструктивных исполнений порталов. Результаты расчетов отражены на рис. 6, где стрелкой показан размах деформаций, которые возникают в рассматриваемой конструкции при различных силах натяга. Поскольку предельным приростом продольной жесткости портала является $\approx 4,5$ раза (см. рис. 5), то теоретически предложенное исполнение с достаточно большим предварительным натягом может достигнуть по уровню деформаций исполнения портала с чугунными стойками (рис. 6).

Далее оценим, как изменится демпфирование при включении в композитную конструкцию предложенного армирования. Результаты отражены на рис. 7.

Конструкция портала с чугунными колоннами намеренно не включена в расчет как один из случаев, так как демпфирующие способности чугуна заведомо ниже аналогичных у композита (полимербетона) [17, с. 98]. Как видно из графиков на рис. 7, кратного прироста демпфирования не наблюдается, но можно констатировать сохранение высокого демпфирования от композитной составляющей конструкции и некоторое положительное влияние армирования.

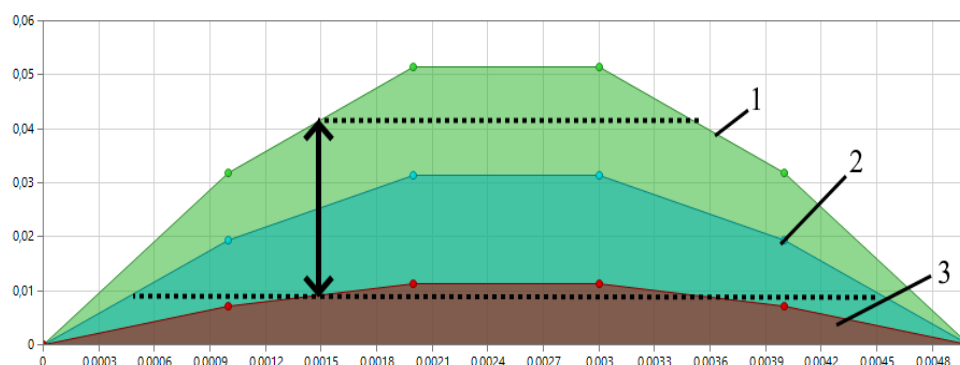


Рис. 6. Зависимость перемещений от времени для трех исполнений порталов:
1 – композитные стойки без армирования; 2 – композитные стойки с напряженным армированием шпильками; 3 – чугунные цельнолитые стойки

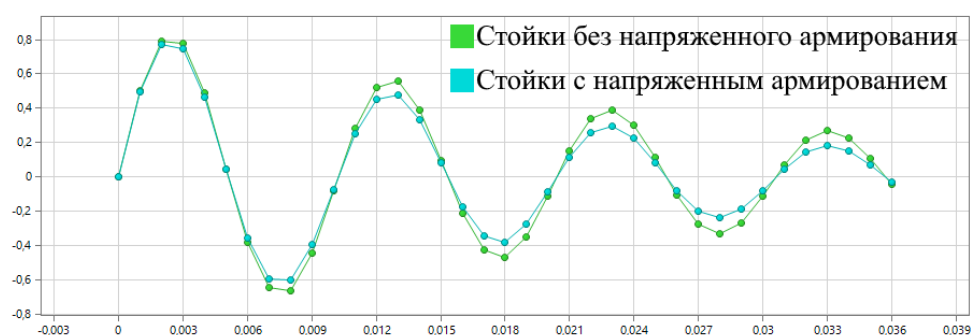


Рис. 7. Переходный процесс затухания колебаний для оценки демпфирования

Оценим численно изменение демпфирующей способности на основе результатов (рис. 7) по логарифмическому декременту затухания колебаний.

Для рассмотренного случая декремент затухания колебаний стоек, армированных шпильками с предварительным натягом, больше на 47 %, чем у стоек, армированных без натяга (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета логарифмического декремента затухания колебаний

Расчетный случай	Значение декремента
Армирование стоек портала без натяга	0,32
Армирование стоек портала с натягом, равным $3,25F$	0,47

Обсуждение

Применение предварительного натяга армирующих элементов в конструкции портала малогабаритного станка показывает себя перспективным и технически значимым решением, но требующим дополнительных технологических мероприятий и, в некоторых случаях, приспособлений, поскольку необходимые силы упругих деформаций шпилек могут изменяться от сотен ньютонов, до десятков и сотней килоньютонов. Вероятно, помимо способа затяж-

ки гаек с усилием при помощи динамометрического ключа, может понадобиться нагрев шпилек.

Кратный прирост жесткости конструкции от применения напряженного армирования (до 4,7 раза) позволяет приблизиться к жесткости чугунного исполнения, но процесс изготовления композитных армированных колонн портала, в отличие от чугунных, не подразумевает литья металла, а значит, может иметь и положительный экономический эффект.

В целом цементный бетон при армировании несколько теряет в демпфирующих свойствах [18, с. 37–39; 19, с. 78], однако в данном случае, вероятно, за счет структуры дисперсно-упрочненного композита (коэффициент демпфирования), наличия предварительного натяга в шпильках и увеличенной границе контакта двух сред ввиду наличия витков резьбы этот эффект был нивелирован.

Все коэффициенты демпфирования, в том числе коэффициенты, учитывающие контактное трение в парах были приняты по табличным значениям для стали и полимербетона соответственно. Поэтому экспериментальная разница в демпфировании может оказаться не столь значительной.

Заключение

Применение предлагаемого технического решения позволяетратно снизить амплитуду деформаций портала малогабаритного станка, причем, так как получаемый прирост зависит от величины сообщаемого шпилькам упругого растяжения, имеется возможность создавать конструкции с заранее определенными свойствами жесткости под различные задачи.

Таким образом, повышение свойств жесткости и демпфирования портала при сравнительно малой металлоемкости представляет интерес для направления малогабаритных металлорежущих станков.

В качестве дальнейших шагов в рамках тематики данного исследования следует выделить:

- 1) необходимость уточнения полученных теоретических результатов путем проведения эксперимента с реальным опытным образцом, что особенно актуально для результатов по определению демпфирования;
- 2) необходимость точно выявить степень влияния жесткости и демпфирования портала малогабаритного фрезерного станка на конечную точность обработки;
- 3) выявить зависимость влияния силы натяга шпилек на демпфирование и получить экспериментально набор амплитудно-частотных характеристик.

Список литературы

1. Хусаинов Р. М., Мубаракшин И. И., Сабиров А. Р. Исследование упругих деформаций при обработке на вертикально-фрезерных станках // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 5. С. 304–308. С. 304.
2. Капаев К. С., Ваниев Э. Р., Васильев А. В. Модернизация токарно-револьверного станка 1а616 для повышения жесткости несущей системы за счет проведения модального анализа // Вестник современных технологий. 2024. № 2. С. 25.
3. Старовойтов Н. А., Рогов С. В. Исследование амплитудно-фазово-частотных характеристик абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой // Вестник Брестского государственного технического университета. 2024. № 1 (133). С. 116–119.
4. Довнар С. С., Колесников Л. А., Яцкевич О. К., Авсиевич А. М., Шашко А. Е. Повышение статической жесткости несущей системы 5-осевого станка с ЧПУ // Пер-

- спективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тезисы докл. 36-й междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.). Минск : Бизнесофсет, 2022. С. 28–31. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/111440>
5. Файзиматов Ш. Н., Анвархужаев Т. Б. У., Тажибаев Н. З. У. Факторы, влияющие на точность обработки на токарных станках // Scientific progress. 2021. Т. 2, № 2. С. 294–296.
6. Селезнёв А. Д. Влияние жёсткости технологической системы на точность обработки. Токарная обработка // 3D-технологии в решении научно-практических задач. Красноярск, 2021. С. 91–95.
7. Шевелёв И. В. Разработка трёхкоординатного фрезерного станка с ЧПУ центра «Формула Станок» : магистерская диссертация / Тольяттинский государственный университет. Тольятти, 2019. 124 с.
8. Патент 2813041 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 1/01. Способ изготовления полимербетонного основания станка / Романов С. А. ; заявитель ООО «ПЛОТ». № 2023118465 ; заявл. 12.07.2023 ; опубл. 06.02.2024.
9. Производитель «ASGARD» [Электронный ресурс]. URL: <https://acnc.ru/sintegran/components> (дата обращения: 26.04.2025).
10. Кирилин Ю. В. Применение полимербетона для изготовления базовых деталей тяжёлых фрезерных станков // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2008. № 2. С. 41.
11. Туромша В. И., Довнар С. С., Туми Эль-Мабрук Абужафер Али. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри» // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2011. № 3 (46). С. 015–028.
12. Василевич Ю. В., Довнар С. С., Карабанюк И. А. Конечно-элементный анализ влияния бетонного наполнителя на динамическую жесткость портала тяжелого станка // Наука и техника. 2016. № 3. С. 233–241.
13. Кучеров В. А., Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г. Армированные композитные стойки повышенной жесткости для металлорежущих малогабаритных станков с ЧПУ // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2024. № 17. С. 165–168.
14. Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с ЧПУ путем применения нагруженных армирующих элементов в их станине // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 3 (129). С. 1–12.
15. Кравчук В. А. Стальные сжато-изогнутые стержни, предварительно напряженные без затяжек : монография. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан гос. ун-та, 2017. 278 с.
16. Вахрушев А. И., Алексанян Г. А. Аппроксимация функций // Прикладные вопросы точных наук. Армавир, 2018. С. 35.
17. Selvakumar A., Mohanram P. V. Analysis of alternative composite material for high speed precision machine tool structures // Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. 2012. Vol. 10, № 2. P. 95.
18. Хазов П. А., Ерофеев В. И., Лотов Д. М., Ситникова А. К., Помазов А. П. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений // Приволжский научный журнал. 2022. № 3. С. 36–43.
19. Кудрявцев А. А., Модестов В. С., Лукин А. В. Конечно-элементное моделирование и исследование динамического нагружения железобетонной балки // Неделя науки СПбПУ. СПб., 2016. С. 77–80.

References

1. Khusainov R.M., Mubarakshin I.I., Sabirov A.R. Study of elastic deformations during machining on vertical milling machines. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2015;(5):304–308. S. 304. (In Russ.)

2. Kapaev K.S., Vaniev E.R., Vasil'ev A.V. Modernization of the 1a616 turret lathe to increase the rigidity of the supporting system by conducting a total analysis. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy = Bulletin of Modern Technologies*. 2024;(2):25. (In Russ.)
3. Starovoytov N.A., Rogov S.V. Study of the amplitude-phase-frequency characteristics of an abrasive cutting machine with an oscillating spindle head. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Brest State Technical University*. 2024;(1):116–119. (In Russ.)
4. Dovnar S.S., Kolesnikov L.A., Yatskevich O.K., Avsievich A.M., Shashko A.E. Increasing the static rigidity of the supporting system of a 5-axis CNC machine. *Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhnologii mashinostroeniya i metalloobrabotki: tezisy dokl. 36-y mezhdun. nauch.-tekhn. konf. (Minsk, 7 aprelya 2022 g.) = Promising directions of development of mechanical engineering and metalworking technologies: proceedings of the 36th International scientific and engineering conference*. Minsk: Biznesofset, 2022:28–31. (In Russ.). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/111440>
5. Fayzimatov Sh.N., Anvarkhuzhaev T.B.U., Tazhibaev N.Z.U. Factors affecting the accuracy of lathe machining. *Scientific progress*. 2021;2(2):294–296. (In Russ.)
6. Seleznev A.D. The influence of technological system rigidity on machining accuracy. Turning. *3D-tekhologii v reshenii nauchno-prakticheskikh zadach = 3D-technologies in solving scientific and practical problems*. Krasnoyarsk, 2021:91–95. (In Russ.)
7. Shevelev I.V. Development of a three-axis CNC milling machine at the Formula Stanok center: Master's thesis. *Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet = Togliatti State University*. Tol'yatti, 2019:124. (In Russ.)
8. Patent 2813041 C1 Russian Federation, MPK B23Q 1/01. *Sposob izgotovleniya polimerbetonnogo osnovaniya stanka = Method for manufacturing a polymer concrete base for a machine*. Romanov S.A.; applicant OOO «PLOT». № 2023118465; appl. 12.07.2023; publ. 06.02.2024. (In Russ.)
9. *Proizvoditel' «ASGARD» [Elektronnyy resurs] = Manufacturer “ASGARD” [Electronic resource]*. (In Russ.). Available at: <https://acnc.ru/sintegran/components> (accessed 26.04.2025).
10. Kirilin Yu.V. The use of polymer concrete for the production of basic components for heavy milling machines. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*. 2008;(2):41. (In Russ.)
11. Turomsha V.I., Dovnar S.S., Tumi El'-Mabruk Abuzhafer Ali. Rigidity analysis of the movable portal of a “Gentri” type longitudinal milling machine. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo = Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*. 2011;(3):015–028. (In Russ.)
12. Vasilevich Yu.V., Dovnar S.S., Karabanyuk I.A. Finite element analysis of the effect of concrete filler on the dynamic stiffness of a heavy machine tool portal. *Nauka i tekhnika = Science and technology*. 2016;(3):233–241. (In Russ.)
13. Kuchеров V.A., Voronov R.D., Levashkin D.G. High-rigidity reinforced composite stands for small-sized CNC metal-cutting machines. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii = Computer-aided design in mechanical engineering*. 2024;(17):165–168. (In Russ.)
14. Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Increasing the accuracy of desktop CNC machines by using loaded reinforcing elements in their frames. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International research journal*. 2023;(3):1–12.
15. Kravchuk V.A. *Stal'nye szhato-izognutyie sterzhni, predvaritel'no napryazhennye bez zatyazhek: monografiya = Steel compressed-bent rods, prestressed without ties: monograph*. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean gos. un-ta, 2017:278. (In Russ.)
16. Vakhrushev A.I., Aleksanyan G.A. Function approximation. *Prikladnye voprosy tochnykh nauk = Applied issues of exact sciences*. Armavir, 2018:35. (In Russ.)

17. Selvakumar A., Mohanram P.V. Analysis of alternative composite material for high speed precision machine tool structures. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2012;10(2):5.
18. Khazov P.A., Erofeev V.I., Lotov D.M., Sitnikova A.K., Pomazov A.P. Experimental study of the strength of composite tube-concrete samples of small sections. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal = Volga Region Scientific Journal*. 2022;(3):36–43. (In Russ.)
19. Kudryavtsev A.A., Modestov V.S., Lukin A.V. Finite element modeling and dynamic loading study of reinforced concrete beam. *Nedelya nauki SPbPU = Bulletin of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. SPb., 2016:77–80. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Дмитриевич Воронов

преподаватель кафедры оборудования и технологий машиностроительного производства, Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: smr.rom@yandex.ru

Roman D. Voronov

Lecturer of the sub-department of equipment and technologies of machine-building production, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Иван Николаевич Семдянов

Инженер, НИО-4 «Оксидные слои, покрытия и пленки», Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: semdyanov.i.n@yandex.ru

Ivan N. Semdyanov

Engineer, SRD-4 “Oxide layers, coatings and films”, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Денис Геннадьевич Левашкин

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования и технологий машиностроительного производства, Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: denis.levden@yandex.ru

Denis G. Levashkin

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of equipment and technologies for mechanical engineering production, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Дмитрий Юрьевич Воронов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования и технологий машиностроительного производства, Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: dmitridmitric@yandex.ru

Dmitry Yu. Voronov

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of equipment and technologies for mechanical engineering production, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 07.05.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 16.06.2025

Принята к публикации / Accepted 04.08.2025

УДК 621.813

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-11

Определение несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения с применением полимерных анаэробных материалов

И. И. Воячек¹, Д. В. Кочетков², О. А. Низов³^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru, ³tmspgu@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение функциональных свойств резьбовых соединений является актуальной задачей производства. Рассматривается новое комбинированное резьбогладкое соединение (РГС) с использованием полимерных анаэробных материалов, функциональные свойства которого изучены недостаточно. Соединение содержит резьбовой и гладкий цилиндрический участок сопряжения деталей, а также промежуточный слой анаэробного материала, находящийся в зазоре между поверхностями деталей. Цель работы – определение влияния цилиндрического участка с анаэробным материалом на несущую способность комбинированного РГС. *Материалы и методы.* Определение параметров контактирования деталей и несущей способности РГС ведется аналитическим методом и путем компьютерного моделирования методом конечных элементов. *Результаты.* Разработана методика проектирования и определения несущей способности РГС. *Выводы.* Установлено, что цилиндрический участок соединения с анаэробным материалом воспринимает существенную долю эксплуатационной нагрузки, что позволяет разгрузить резьбовую часть и повысить несущую способность комбинированного соединения. Цилиндрический участок РГС необходимо формировать со стороны приложения эксплуатационной нагрузки. Конструкция РГС технологична и не требует существенных затрат при практической реализации.

Ключевые слова: комбинированное резьбогладкое соединение, анаэробный полимерный материал, несущая способность

Для цитирования: Воячек И. И., Кочетков Д. В., Низов О. А. Определение несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения с применением полимерных анаэробных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 147–156. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-11

Determination of the load-bearing capacity of a combined threaded smooth connection using polymeric anaerobic materials

I.I. Voyachek¹, D.V. Kochetkov², O.A. Nizov³^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru, ³tmspgu@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the functional properties of threaded connections is a pressing manufacturing challenge. This paper explores a new combined threaded connection (CTC) using anaerobic polymer materials, the functional properties of which have been insufficiently studied. The connection contains a threaded and smooth cylindrical section of the mating parts, as well as an intermediate layer of anaerobic material located in the gap between the surfaces of the parts. The purpose of the study is to determine the influence of a cylindrical section with anaerobic material on the bearing capacity of a combined CTC.

Materials and methods. The determination of the contact parameters of the parts and the load-bearing capacity of the CTC is carried out using an analytical method and computer modeling using the finite element method. *Results.* A methodology for designing and determining the bearing capacity of CTC has been developed. *Conclusions.* It has been established that the cylindrical section of the connection with the anaerobic material bears a significant portion of the operating load, which allows for the relief of the threaded part and increases the load-bearing capacity of the combined connection. The cylindrical section of the CTC must be formed on the side where the operational load is applied. The CTC design is technologically feasible and does not require significant investment in practical implementation.

Keywords: combined threaded smooth connection, anaerobic polymer material, load-bearing capacity

For citation: Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Nizov O.A. Determination of the load-bearing capacity of a combined threaded smooth connection using polymeric anaerobic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):147–156. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-11

Введение

Резьбовые соединения (РС), которые широко используются в разных конструкциях, должны надежно выполнять заданные функции при различных условиях нагружения.

Для комплексного обеспечения требуемых характеристик РС в большинстве случаев необходимо сочетание различных конструкторских и технологических решений, что обычно приводит к удорожанию процесса производства и не всегда оказывается оправданным с точки зрения эффективности [1–11].

Известна технология сборки резьбовых соединений с использованием полимерных анаэробных материалов [4–9], которая показала высокую эффективность. Анаэробные материалы находятся в жидком состоянии на воздухе и полимеризуются в зоне контакта деталей в условиях отсутствия кислорода, приобретая достаточную сдвиговую прочность.

Предлагается проектировать и применять комбинированное резьбогладкое соединение (РГС), содержащее резьбовой и гладкий цилиндрический участки сопряжения деталей, а также промежуточный слой анаэробного материала (АМ), находящийся в зазоре между цилиндрическими сопрягаемыми поверхностями (рис. 1). Предполагается, что цилиндрический участок соединения с АМ должен воспринимать существенную долю эксплуатационной нагрузки, что позволит разгрузить резьбовую часть и повысить несущую способность комбинированного соединения. Можно размещать АМ и в зоне резьбового контакта, что дополнительно повышает прочность и жесткость РС [10, 11].

Определение параметров контактирования и несущей способности комбинированного резьбогладкого соединения

Определение функциональных свойств резьбовых соединений при сборке с АМ подробно изложено в статье [5]. Ниже приводится аналитическое определение параметров контактирования и свойств комбинированного РГС (рис. 1) с применением АМ.

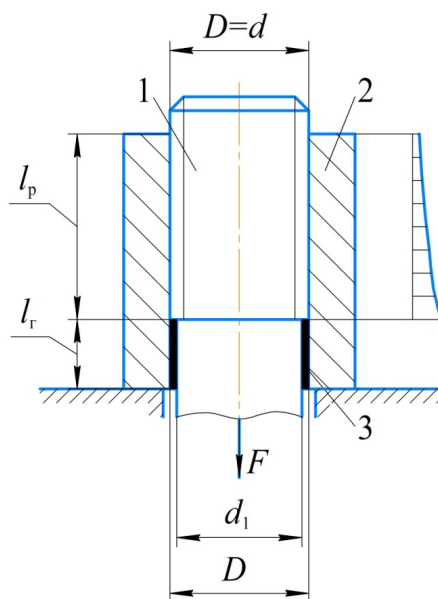


Рис. 1. Общий вид комбинированного РГС
(справа показана эпюра распределения осевой нагрузки по виткам резьбы):
1 – болт; 2 – гайка; 3 – промежуточный слой АМ

На рис. 1 обозначено: F – осевая нагрузка на соединение; $D = d$ – номинальный диаметр резьбы и гладкого участка; d_1 – диаметр стержня болта; l_p – длина резьбового участка соединения; l_r – длина гладкого участка соединения, равная длине контактного слоя из АМ.

Общую осевую нагрузку, действующую на РГС, можно разделить на две части:

$$F = F_p + F_r, \quad (1)$$

где F_p – часть осевой силы, воспринимаемая резьбовым участком РГС; F_r – часть осевой силы, воспринимаемая гладким цилиндрическим участком РГС с промежуточным контактным слоем из АМ.

Так как при действии нагрузки, например осевой силы, податливость контактного слоя из АМ на гладком участке значительно больше, чем податливость соединяемых деталей, то можно считать их абсолютно жесткими по отношению к контактному слою. В этом случае действующая нагрузка F_r распределяется в контактном слое из АМ равномерно по длине и ее интенсивность будет равна:

$$q(z) = q_r = \frac{F_r}{l_r} = \text{const}. \quad (2)$$

Величину F_r предлагается определять по формуле

$$F_r = \frac{\pi D l_r \sum \delta_{p \max} G_{\text{AM}}}{t_{\text{AM}}}, \quad (3)$$

где $t_{AM} = S/2$ – толщина контактного слоя АМ, равная зазору между деталями на цилиндрическом участке или половине посадочного диаметрального зазора; $\sum \delta_{pmax}$ – максимальное суммарное относительное перемещение витков резьбы при действии осевой нагрузки; G_{AM} – модуль сдвига полимеризованного АМ.

При действии осевой силы на РГС происходит относительное смещение сопрягаемых деталей. С некоторым приближением можно считать, что максимальное относительное смещение деталей в РГС и, следовательно, на гладком участке будет равно максимальному суммарному относительному перемещению витков $\sum \delta_{pmax}$, которое реализуется на первом витке резьбового участка (ближайшего к точке приложения нагрузки).

В литературе практически отсутствуют данные по упругим константам марок АМ, в частности, не определены модули сдвига G_{AM} .

Известно, что для однородного изотропного твердого материала упругие константы связаны соотношением

$$G_{AM} = \frac{E_{AM}}{2(1 + \mu_{AM})}, \quad (4)$$

которым в первом приближении можно воспользоваться, если неизвестен модуль сдвига АМ. Модуль упругости АМ E_{AM} можно считать соответствующим модулю упругости пластмасс.

Таким образом, применительно к РГС имеются два соотношения – (1) и (3), в которых три взаимосвязанных величины F_p , F_r и $\sum \delta_{pmax}$ неизвестны. Для их нахождения используется условие совместности деформаций или перемещений при нагружении РГС, и расчет ведется методом последовательных приближений.

В нулевом приближении ($i = 0$) считается, что вся нагрузка воспринимается резьбовым соединением $F_p(i) = F_p^0 = F$. Предполагается, что перемещения деталей на гладком участке равны максимальным суммарным перемещениям на первом витке $\delta_r(i) = \sum \delta_{pmax}(i)$ или в нулевом приближении $\delta_r = \sum \delta_{pmax}^0$. Значения суммарных перемещений на первом витке при отсутствии АМ определяются по методике И. И. Воячека и Д. В. Кочеткова [5, 6, 8, 9].

Следующим этапом является первое приближение ($i = 1$). Определяется значение нагрузки, воспринимаемой гладким участком $F_r(i)$, по формуле (3).

Корректируется значение нагрузки, приходящейся на резьбовой участок по формуле

$$F_p(i) = F_p^0 - F_r(i). \quad (5)$$

Чтобы исключить случай, когда разность в формуле (5) может быть отрицательной или нулевой, проводится проверка $F_p(i) \geq 0$. Если разность отрицательная или нулевая, то можно уменьшить длину гладкого участка l_r .

Затем циклы приближений повторяются. В каждом цикле определяется относительное перемещение на первом витке с учетом уменьшения нагрузки на резьбовое соединение. Так как в соответствии с [5, 6, 8, 9] перемещения пропорциональны действующей нагрузке, то можно использовать формулу

$$\sum \delta_{p\max}(i) = \sum \delta_{p\max}^0 \frac{F_p(i)}{F_p^0}. \quad (6)$$

Циклы повторяются до тех пор, пока не выполнится условие (7), где можно принять $\Delta = 0,01$:

$$\frac{|F_p(i) - F_p(i-1)|}{F_p(i)} \leq \Delta = 0,01. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) необходимо провести еще одну проверку, связанную с предельным значением сдвиговой прочности применяемого АМ – $\tau_{сдАМ}$ и соответствующую условию

$$F_{\Gamma}(i) \leq \frac{A_{a,\Gamma} \tau_{сдАМ}}{n}, \quad (8)$$

где $A_{a,\Gamma} = \pi D l_{\Gamma}$ – номинальная площадь контакта деталей на гладком участке; n – коэффициент запаса прочности, связанный с несплошным заполнением АМ зазора на гладком участке РГС и возможным отличием сдвиговой прочности АМ от паспортного значения.

Если условие (8) не выполняется, то необходимо увеличить длину гладкого участка l_{Γ} или выбрать АМ с более высоким значением $\tau_{сдАМ}$.

После окончания вычислений следует зафиксировать следующие параметры РГС: F , $F_p(i)$, $F_{\Gamma}(i)$, $\sum \delta_{p\max}^0$, $\sum \delta_{p\max}(i)$, $\delta_{\Gamma}(i)$.

Пример расчета РГС

Расчет параметров РГС проводился при следующих исходных данных: резьбовое соединение типа болт-гайка *M10 – 6H/6g*; диаметры резьбы – $d = D = 10$ мм, $d_1 = D_1 = 8,647$ мм, $d_2 = D_2 = 9,188$ мм; $D_0 = 17$ мм; $P = 1,25$ мм; угол наклона боковых сторон профиля резьбы $\alpha = 60^\circ$; длина резьбового участка соединения $l_p = 6$ мм; длина гладкого участка соединения $l_{\Gamma} = 5$ мм; материал болта – сталь *45X* (модуль упругости $E_1 = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_1 = 0,32$) и гайки – сталь *35X* (модуль упругости $E_2 = 2,14 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_2 = 0,29$); анаэробный материал марки НМ162 (модуль упругости $E_{AM} = 2,62 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_{AM} = 0,38$, сдвиговая прочность $\tau_{сдАМ} = 30$ МПа). К резьбогладкому соединению прикладывается внешняя осевая нагрузка $F = 10$ кН.

Расчет резьбового соединения с приведенными выше данными выполнен в работах [5, 6, 8, 9] и определено, что на первом витке при действии нагрузки $F = 10$ кН суммарное перемещение равно $\sum \delta_{p\max}^0 \approx 4$ мкм, которое принимается за перемещение в слое АМ.

Определяется константа сдвига АМ по формуле (4):

$$G_{AM} = \frac{2,62 \cdot 10^3 \text{ МПа}}{2(1 + 0,38)} \approx 950 \text{ МПа} = 95 \text{ кг/мм}^2.$$

Первое приближение. Если принять $t_{AM} = S/2 = 0,1$ мм, то по формуле (3) можно найти

$$F_T(1) = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 0,004 \cdot 95}{0,1} = 596 \text{ кг} = 5,96 \text{ кН}$$

и по формуле (5):

$$F_p(1) = F_p^0 - F_T(1) = 10 - 5,96 = 4,04 \text{ кН}.$$

По формуле (6) корректируется максимальное перемещение в РГС:

$$\sum \delta_{p\max}(1) = \sum \delta_{p\max}^0 \frac{F_p(1)}{F_p^0} = 0,004 \frac{4,04}{10} = 0,0016 \text{ мм},$$

которое подставляется в формулу (3).

Конечное приближение. После всех итераций при выполнении условия (7) получено $F_T = 3,7$ кН, $F_p = 6,3$ кН.

Условие (8) выполняется:

$$F_T \leq \frac{A_{a,\Gamma} \tau_{сдАМ}}{n} = \frac{\pi D l_T \tau_{сдАМ}}{n} = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3,0}{1,2} = 393 \text{ кг} = 3,93 \text{ кН}.$$

Фиксируются значения:

$$F = 10 \text{ кН}, F_T = 3,7 \text{ кН}, F_p = 6,3 \text{ кН},$$

$$\sum \delta_{p\max}^0 = 0,004 \text{ мм}, \sum \delta_{p\max} = 0,00257 \text{ мм} = \delta_T.$$

Таким образом, гладкий участок РГС с прослойкой из полимеризованного АМ воспринимает 37 % эксплуатационной нагрузки, существенно разгружает наиболее нагруженный первый виток и всю резьбовую часть соединения.

Компьютерное моделирование резьбогладкого соединения при действии осевой нагрузки

Полученные выше результаты коррелируют с данными компьютерного моделирования.

На рис. 2 представлена твердотельная расчетная модель РГС с приложением осевой нагрузки, в которой АМ заполняет зазоры на гладком участке.

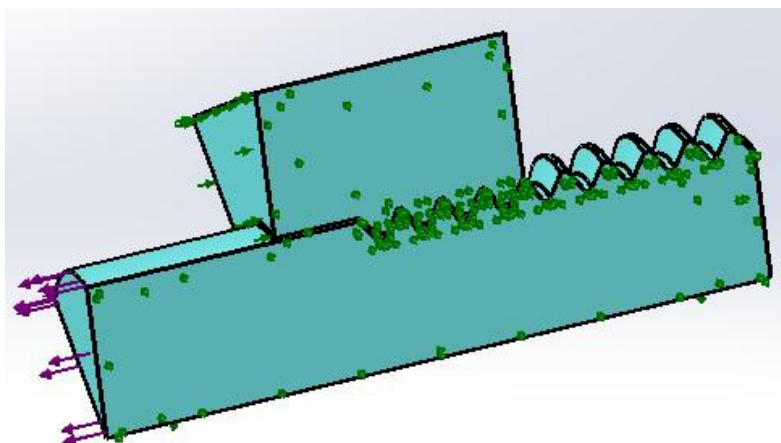


Рис. 2. Твёрдотельная расчетная модель резьбогладкого соединения
(на гладком участке в зазоре между деталями находится АМ)

В табл. 1 приведены данные по распределению нагрузки F по виткам резьбы в РГС при сборке с АМ, полученные при компьютерном моделировании методом конечных элементов с исходными данными, соответствующими примеру расчета РГС [10, 11].

Таблица 1
Распределение нагрузки по виткам РГС при сборке с АМ

Значение коэффициента трения между витками f и зазора на гладком участке t_{AM}	Доля нагрузки, приходящаяся на витки, F_i / F , %				Суммарная нагрузка на витки, %
	1-й виток	2-й виток	3-й виток	4-й виток	
АМ заполняет зазор только на гладком участке					
$f = 0,2$; $t_{AM} = 0,138$ мм	25,21	17,11	13,65	14,06	70,03

Если принять, что суммарная нагрузка на витки резьбы при отсутствии АМ равна 100 %, то уменьшение нагрузки на витки в случае нахождения АМ только на гладком участке составило около 30 % (при $t_{AM} = 0,138$ мм). При расчете уменьшение составило 37 %, но при $t_{AM} = 0,1$ мм. Учитывая, что с уменьшением зазора эффект разгрузки витков увеличивается, то корреляция данных, полученных при моделировании и путем расчета по аналитическим зависимостям, достаточно высокая.

Заключение

В ходе исследования характеристик резьбогладкого соединения было установлено, что гладкий участок с прослойкой из анаэробных материалов эффективно воспринимает значительную часть эксплуатационных нагрузок. Это приводит к снижению перемещений в области резьбового контакта и, следовательно, к повышению жесткости комбинированного соединения, а также к снижению концентрации напряжений. Все эти улучшения создают условия для значительного увеличения несущей способности соединения

не только при действии осевой силы, но и при нагружении крутящим и изгибающим моментами, особенно при наличии переменного нагружения, что является критически важным фактором для надежности работы конструкций в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, наблюдается разделение функций между разными участками соединения: во время процесса затягивания резьбогладкого соединения нагружается прежде всего резьбовой участок, тогда как дополнительная эксплуатационная нагрузка в значительной степени воспринимается цилиндрическим участком, содержащим прослойку из АМ. Увеличение площади гладкого цилиндрического участка способствует росту его несущей способности, что позволяет более равномерно распределять эксплуатационную нагрузку между участками РГС. Данное разделение функций в РГС не только увеличивает эффективность работы соединения, но и продлевает срок его службы, уменьшая вероятность усталостного износа.

Список литературы

1. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М. : Машиностроение, 1990. 368 с.
2. Березин С. Я., Леонов В. Н. Упругие модели в решении задачи Н. Е. Жуковского // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 4. С. 23–27.
3. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин : учебник для машиностроительных специальностей вузов. 12-е изд., испр. М. : Высш. шк., 2008. 408 с.
4. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Пенза, 2006. 401 с.
5. Кочетков Д. В. Технологическое обеспечение прочности и жесткости резьбовых соединений при сборке с применением анаэробных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08, 01.02.06. Пенза, 2010. 210 с.
6. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Влияние анаэробных материалов на распределение нагрузки в резьбовом соединении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 6. С. 34–39.
7. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Перспективы применения анаэробных материалов при сборке соединений технологического оборудования // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пенза, 1–3 июня 2023 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. А. Е. Зверовщикова; к.т.н., доцента С. А. Нестерова; к.т.н., доцента Д. В. Кочеткова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 280–286.
8. Voyachek I. I., Kochetkov D. V., Mityasov S. G. Rational Provision of Robustness Properties of Bolted Joints of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials // Lecture Notes in Mechanical Engineering : Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Switzerland : Springer International Publishing, 2020. Vol. 2. P. 163–170. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_18
9. Воячек И. И., Кочетков Д. В. Комплексное повышение эксплуатационных характеристик резьбовых соединений при сборке с анаэробными материалами // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 41–46.
10. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Вантеев А. Н., Фадеев Н. А., Баранов И. В. Распределение нагрузки в резьбогладком соединении при сборке с анаэробными материалами // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. С. 3–8.

11. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Вантеев А. Н., Фадеев Н. А., Баранов И. В. Рациональное обеспечение качества резьбогладких соединений, собранных с применением анаэробных материалов // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. С. 22–27.

References

1. Birger I.A., Iosilevich G.B. *Rez'bovye i flantsevye soedineniya = Threaded and flanged connections*. Moscow: Mashino-stroenie, 1990:368. (In Russ.)
2. Berezin S.Ya., Leonov V.N. Elastic models in solving N.E. Zhukovsky's problem. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in mechanical engineering and instrument making*. 2007;(4):23–27. (In Russ.)
3. Ivanov M.N., Finogenov V.A. *Detali mashin: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov. 12-e izd., ispr. = Machine parts: a textbook for mechanical engineering specialties at universities. The 12th edition, revised*. Moscow: Vyssh. shk., 2008:408. (In Russ.)
4. Voyachek I.I. *Quality assurance of fixed connections based on an integrated design and engineering system*. DSc dissertation: 05.02.08. Penza, 2006:401. (In Russ.)
5. Kochetkov D.V. *Technological support for the strength and rigidity of threaded connections during assembly using anaerobic materials*. PhD dissertation: 05.02.08, 01.02.06. Penza, 2010:210. (In Russ.)
6. Voyachek I.I., Kochetkov D.V. The influence of anaerobic materials on load distribution in a threaded connection. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in mechanical engineering and instrument making*. 2010;(6):34–39. (In Russ.)
7. Voyachek I.I., Kochetkov D.V. Prospects for the use of anaerobic materials in the assembly of process equipment connections. *Aktual'nye problemy stankostroeniya – 2023: sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Penza, 1–3 iyunya 2023 g.) = Current issues in machine tool manufacturing – 2023: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (Penza, June 1-3, 2023)*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:280–286. (In Russ.)
8. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G. Rational Provision of Robustness Properties of Bolted Joints of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Switzerland: Springer International Publishing, 2020;2:163–170. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_18
9. Voyachek I.I., Kochetkov D.V. Comprehensive improvement of the performance characteristics of threaded connections during assembly with anaerobic materials. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*. 2017;(2):41–46. (In Russ.)
10. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Vanteev A.N., Fadeev N.A., Baranov I.V. Load distribution in threaded smooth connections during assembly with anaerobic materials. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM: sb. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Design, modeling, production preparation and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM: proceedings of the 11th International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2017:3–8. (In Russ.)
11. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Vanteev A.N., Fadeev N.A., Baranov I.V. Rational quality assurance of threaded smooth connections assembled using anaerobic materials. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM: sb. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. = Design, modeling, production preparation and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM: proceedings of the 11th International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2017:22–27. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: voyachek@list.ru

Igor I. Voyachek

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of mechanical engineering technologies
and equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Викторович Кочетков

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой металлорежущих
станков, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Denis V. Kochetkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of metal cutting machines, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Олег Алексеевич Низов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tmspgu@mail.ru

Oleg A. Nizov

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 23.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.05.2025

Принята к публикации / Accepted 29.09.2025

УДК 621.791.13

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-12

Аспекты разработки и исследования свойств нового типа броневых гетерогенных материалов на основе алюминия и титана, полученных с применением технологии сварки взрывом

Д. Б. Крюков¹, А. О. Кривенков², М. С. Гуськов³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ddbkk@yandex.ru, ²krivenkov80@yandex.ru, ³suralab@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Алюминиевые сплавы давно доказали свою эффективность в качестве материала для бронирования и получили широкое применение. Хотя они и не смогли полностью заменить традиционные стальные брони, в ряде случаев они стали отличной альтернативой благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность при малом весе, устойчивость к коррозии и жесткость. При этом наилучшую эффективность на сегодня показывают сложные гетерогенные структуры на основе алюминия, однако есть ряд существенных недостатков, связанных с методами их получения. Основными из них являются различия в физико-химических и физико-механических свойствах исходных материалов, наличие межслойной коррозии, расслоение, низкий коэффициент адгезии и др. Наиболее перспективной технологией получения такого рода материалов является сварка взрывом. Цель работы – провести оценку комплекса физико-механических свойств, полученного сваркой взрывом нового броневое гетерогенного материала на основе алюминия и титана. *Материалы и методы.* Основным подходом для достижения поставленной цели является проведение комплекса исследований свойств композита: оценку макроструктуры материала, оценку количественного химического состава металлической основы композита и его околосшовной зоны, оценку пулестойкости. Исследование вышеуказанных свойств проводилось по методикам в соответствии с ГОСТ на поверенном оборудовании аттестованным персоналом. *Результаты.* Оценка состояния композиционного материала после сварки взрывом посредством визуально-измерительного контроля и его макроструктуры позволила выбрать рациональный режим сварки, на котором обеспечиваются наилучшее качество композита, без образования в нем участков расслоений и несплавов. Оценка макроструктуры и количественного химического состава металлической основы композита и его околосшовной зоны дала возможность определить свойства и характер роста интерметаллических фаз в зоне сварного шва. Исследование величины пулестойкости полученного композита показало его соответствие классу защитной структуры БрЗ, что при заданной толщине существенно выше аналогичного показателя монометаллической брони. *Выводы.* Применение нового типа броневое гетерогенного материала на основе алюминия и титана, полученного сваркой взрывом, позволило повысить живучесть брони за счет применения новой схемы армирования с механизмом локализации развития хрупких трещин в структуре композита при баллистическом воздействии. Полученный в рамках исследований броневой материал позволяет также снизить вес бронированной техники на 20–25 % при условии сохранения заданного уровня пулестойкости в сравнении с монометаллической алюминиевой броней.

Ключевые слова: сварка взрывом, броневой композиционный материал, прочность, микротвердость, микроструктура, трещиностойкость, интерметаллид, пулестойкость

Для цитирования: Крюков Д. Б., Кривенков А. О., Гуськов М. С. Аспекты разработки и исследования свойств нового типа броневых гетерогенных материалов на основе

алюминия и титана, полученных с применением технологии сварки взрывом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 157–174. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-12

Aspects of development and research of properties of new type of armor heterogeneous materials based on aluminum and titanium, obtained using explosion welding technology

D.B. Kryukov¹, A.O. Krivenkov², M.S. Guskov³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹ddbbkk@yandex.ru, ²krivenkov80@yandex.ru, ³suralab@yandex.ru

Abstract. *Background.* Aluminum alloys have long proven their effectiveness as armor materials and have been widely adopted. Although they have not completely replaced traditional steel armor, in certain cases they have become an excellent alternative due to their unique properties, such as high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and rigidity. Currently, the most effective solutions are complex heterogeneous structures based on aluminum. However, there are several significant drawbacks associated with their production methods. These include differences in the physicochemical and mechanical properties of the base materials, interlayer corrosion, delamination, low adhesion coefficients, and others. In this context, explosive welding is considered the most promising technology for producing such materials. The purpose of this work is to evaluate the complex of physico-mechanical properties of a new heterogeneous armor material based on aluminum and titanium, produced by explosive welding. *Materials and methods.* The primary approach to achieving the stated goal involves conducting a comprehensive study of the composite's properties: assessing the macrostructure of the material, evaluating the quantitative chemical composition of the metallic base of the composite and its heat-affected zone, and assessing bullet resistance. These studies were carried out in accordance with GOST standards using calibrated equipment by certified personnel. *Results.* Evaluation of the composite material's condition after explosive welding through visual and dimensional inspection, as well as analysis of its macrostructure, allowed for the selection of an optimal welding regime that ensures the highest quality of the composite without areas of delamination or incomplete bonding. Assessment of the macrostructure and quantitative chemical composition of the metallic base of the composite and its heat-affected zone provided insights into the properties and growth patterns of intermetallic phases in the weld zone. Testing the bullet resistance of the obtained composite demonstrated its compliance with the Br3 protective structure class, which, at a given thickness, is significantly higher than that of monolithic armor. *Conclusions.* The use of a new type of heterogeneous armor material based on aluminum and titanium, produced by explosive welding, has improved armor survivability through a novel reinforcement scheme that localizes the development of brittle cracks in the composite structure under ballistic impact. The armor material developed in this study also allows for a 20-25% reduction in the weight of armored vehicles while maintaining the required level of bullet resistance compared to monolithic aluminum armor.

Keywords: explosion welding, armor composite material, strength, microhardness, microstructure, crack resistance, intermetallic compound, bullet resistance

For citation: Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Guskov M.S. Aspects of development and research of properties of new type of armor heterogeneous materials based on aluminum and titanium, obtained using explosion welding technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):157–174. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-12

Введение

Алюминиевая броня в последнее время стала одним из ключевых элементов в обеспечении защиты боевой техники от различных видов угроз. Ее эффективность проявляется в превосходстве перед стальной броней при защите от бронебойных пуль крупного и малого калибра, кроме того, алюминий обладает высокой технологичностью, хорошо сваривается и имеет уникальные характеристики противоминной и противоосколочной защиты. История использования алюминия в бронировании началась с разработки специальных алюминиевых сплавов в США, где был создан первый бронетранспортер с алюминиевым корпусом [1]. Затем другие страны, такие как Россия, Англия и Франция, также приступили к разработке собственных алюминиевых бронированных конструкций для своей боевой техники. С появлением специально разработанных алюминиевых броневых сплавов системы Al-Zn-Mg возможности алюминиевой брони значительно расширились. Эти сплавы обеспечивают оптимальное сочетание прочности и пластичности, что делает их идеальными для применения в авиационной технике, танках, бронетранспортерах, боевых роботах, беспилотниках и других боевых машинах.

Главное достоинство алюминиевых сплавов – их низкая плотность. Благодаря этому конструкции на основе алюминиевых сплавов, сохраняя свои функциональные и габаритные размеры, имеют меньший вес по сравнению с аналогичным изделием из конструкционной стали. Такое снижение веса может использоваться для улучшения тактико-технических характеристик бронемашин и средств индивидуальной защиты для повышения пуле- и бронестойкости, увеличения степени защиты экипажа, повышения объема полезной нагрузки и степени вооруженности [2].

Алюминиевые брони хорошо зарекомендовали себя в условиях малых и больших углов обстрела. При малом угле обстрела (менее 40°) алюминиевые сплавы эффективно поглощают энергию баллистического объекта, исключая сквозное пробитие бронеконструкции. При большом угле обстрела (свыше 40°) баллистический объект ricoшетирует от поверхности изделия, не нарушая целостности брони. Однако несмотря на все указанные выше преимущества, основным недостатком алюминиевой брони является невозможность обеспечения сопоставимой со стальной броней противоснарядной стойкости, вследствие чего тяжелая бронированная техника изготавливается по-прежнему на основе стальных моно- и многослойных броней.

Другими широко применяемыми бронематериалами являются сплавы на основе титана. Оценка их пулестойкости различными средствами поражения показывает перспективность их использования как для изготовления средств индивидуальной защиты, так и для легкобронированной техники. Общее снижение веса конструкции на их основе по сравнению со стальной может достигать от 10 до 25 %. Однако ввиду определенных структурных особенностей, связанных с высокой степенью локализации титаном внешнего деформационного воздействия, в чистом виде в качестве броневых материалов с высокой степенью пулестойкости титановые сплавы ограничены к применению. Невозможность реализации высокой динамической твердости титаном связана с эффектом «среза пробки», который заключается в создании условий для сквозного пробития за счет сдвига комплексов атомов в структуре титана по плоскости скольжения [3].

Материалы и методы

На сегодня наиболее перспективным является применение комбинированных (гетерогенных) броней на основе сплавов титана и алюминия, сочетающих в себе весь комплекс преимуществ вышеуказанных сплавов. На кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета разработан новый тип композиционных броневых материалов на основе высокопрочного алюминиевого сплава [4–6]. В качестве основы композита предложено использовать броневой алюминиевый сплав марки В95, являющийся одним из наиболее прочных легких конструкционных сплавов, используемых в том числе и в качестве броневых. На основе сплава В95 изготавливается широкая линейка военной техники легкого класса бронирования – от бронемашин пехоты до катеров и боевых роботов.

Химический состав и механические свойства алюминиевого сплава В95 в соответствии с ГОСТ 4784–97 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав сплава В95, % (ГОСТ 4784–97)

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
до 0,5	до 0,5	0,2–0,6	до 0,1	0,1–0,25	до 0,05	86,3–91,5	1,4–2	1,8–2,8	5–7	Прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Примечание. Al – основа; процентное содержание Al дано приблизительно.

Таблица 2

Механические свойства сплава В95 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 4784–97)

Сортамент	ГОСТ	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_t , МПа	Относительное удлинение, δ , %
Лента отожженная	ГОСТ 13726–97	550–570	–	10
Плита	ГОСТ 17232–99	470–490	390–410	2–4

В качестве армирующих листов композита было предложено использовать титановый сплав марки ВТ1-0. Титановый сплав ВТ1-0 отличается легкостью и жаропрочностью. Изготовленный на его основе прокат имеет небольшую плотность и высокую пластичность. Эти свойства позволяют получать из него изделия любой геометрической формы путем последующего технологического передела.

Химический состав и механические свойства титанового сплава ВТ1-0 в соответствии с ГОСТ 19807–91 приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Химический состав сплава ВТ1-0, % (ГОСТ 19807–91)

Fe	C	Si	N	Ti	O	H	Примеси
до 0,25	до 0,07	до 0,1	до 0,04	99,24 - 99,7	до 0,2	до 0,01	Прочие 0,3

Примечание. Ti – основа; процентное содержание Ti дано приблизительно. Допускается содержание алюминия до 0,7 %.

Таблица 4

Механические свойства сплава ВТ1-0 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 19807–91)

Сортамент	ГОСТ	Предел прочности, σ_b , МПа	Относительное сужение, ψ , %	Относительное удлинение, δ , %
Лист	ГОСТ 22178–76	375	–	20–30
Плита	ГОСТ 23755–79	370–570	24	10

Результаты и обсуждение

В армирующих титановых листах предварительно изготавливают перфорации диаметром 25 мм с целью обеспечения процесса формирования через них соединения между слоями металлической алюминиевой основы матрицы композита. Схема сборки пакета композиционного материала перед сваркой взрывом приведена на рис. 1.

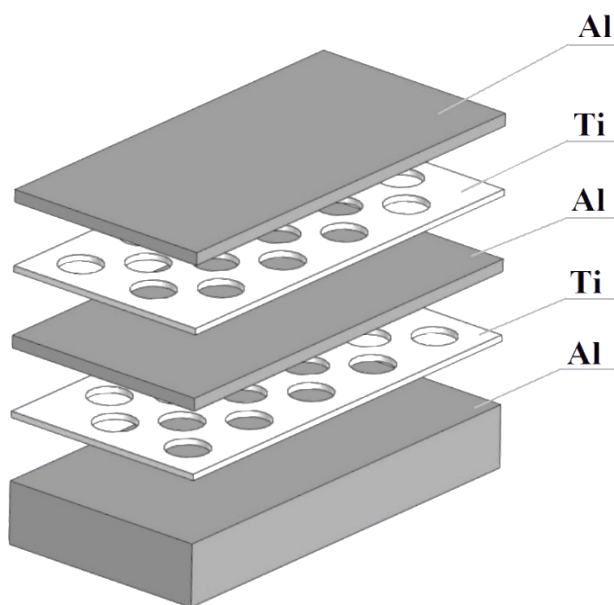


Рис. 1. Схема сборки пакета композиционного материала перед сваркой взрывом

Общее количество слоев броневых композиционных материалов составляет 5 и более, при этом промежуточные 2-й и 4-й армирующие слои располагают таким образом, чтобы отверстия в них перекрывали друг друга, исключая возможное сквозное прохождение через них баллистического объекта (рис. 2) [7].

При получении гетерогенных композиционных материалов на основе сплавов алюминия и титана традиционными способами (пакетная прокатка, диффузионная сварка и др.) возникают сложности с обеспечением прочного соединения между исходными материалами из-за их различия в физико-химических и физико-механических свойствах, например, высокой твердости и прочности одного материала и высокой пластичности при низкой плотности другого. В этой связи авторами было предложено в качестве способа по-

лучения композиционного материала использовать технологию сварки материалов взрывом, не имеющую вышеуказанных ограничений [7–11].

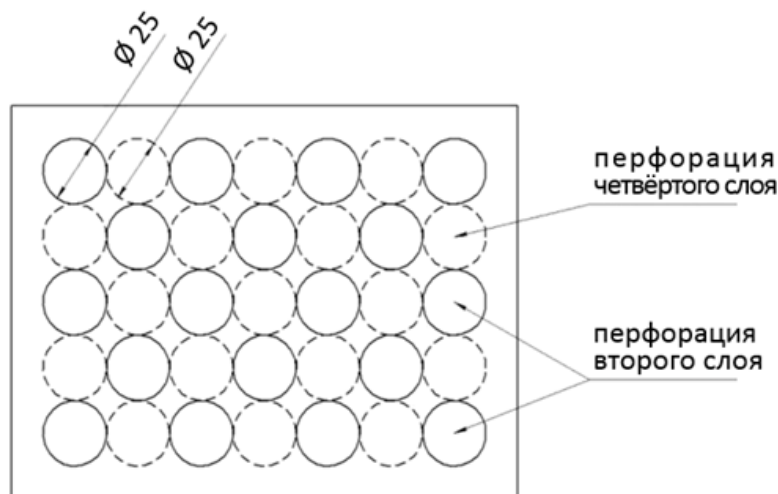


Рис. 2. Схема расположения отверстий в армирующих слоях

На основе анализа технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов для изготовления композиционного материала было предложено использовать плоскопараллельную схему сварки взрывом (рис. 3).

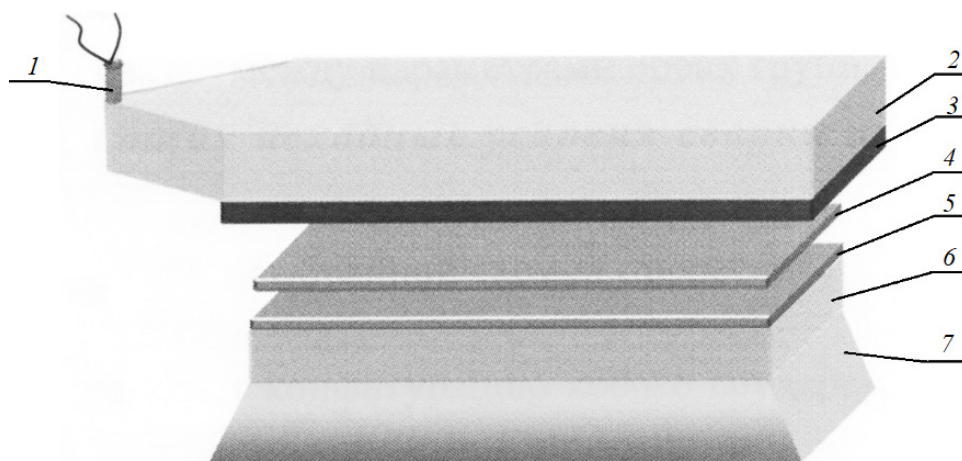


Рис. 3. Схема сварки композиционного материала взрывом: 1 – электродетонатор; 2 – контейнер с взрывчатым веществом; 3 – метаемая пластина; 4 – промежуточная пластина; 5 – неподвижная пластина; 6 – металлическое основание; 7 – грунт

Сварку взрывом производили с использованием взрывчатого вещества, представляющего собой смесь аммиачной селитры с дизельным топливом. На основе анализа состояния композиционного материала после сварки взрывом посредством визуально-измерительного контроля, а также результатов ультразвукового исследования материала был определен рациональный диапазон

технологических параметров ударно-волнового нагружения, обеспечивающий получение качественного композита.

Дальнейший спектр исследований композиционного материала был направлен на изучение его микроструктуры. В ходе исследования было показано, что сваренный на рациональном режиме композиционный материал имеет преимущественно безволновой характер зоны соединения слоев с отсутствием непроваров и интерметаллических включений. Макрошлиф композиционного армированного материала после сварки взрывом представлен на рис. 4.



Рис. 4. Макрошлиф композиционного материала

Выбор композиции сплавов алюминия и титана для изготовления броневых материалов был обусловлен также тем обстоятельством, что на заключительной стадии формирования комплекса свойств композита в структуре материала термической обработкой формируются высокотвердые интерметаллические слои, которые выполняют роль дробящих баллистический объект преград.

Анализ литературных данных и диаграммы состояний бинарной системы Ti–Al (рис. 5) показал, что основным типом интерметаллида, возникающим при взаимной термодиффузии в зоне контакта алюминия и титана, является $TiAl_3$ [12].

Интерметаллид $TiAl_3$ имеет самую низкую плотность $3,4 \text{ г/см}^3$, высокую микротвердость $465\text{--}670 \text{ кг/мм}^2$ и лучшую стойкость к окислению даже при 1000°C .

Полный цикл термической обработки броневых композиционных материалов заключается в отжиге на интерметаллид путем нагрева от 550 до 625°C с последующей выдержкой в печи от 6 до 300 ч. Далее следует закалка образцов при температуре от 460 до 470°C с последующим охлаждением в воде, подогретой до 100°C . После проводится искусственное старение образцов при температуре 110°C с выдержкой в печи в течение 10 ч с последующим охлаждением в печи.

Слои интерметаллида формируются в результате термодиффузионных процессов на границах сваренных слоев композита, при этом скорость роста и толщина интерметаллических прослоек регулируется величиной температуры отжига и временем выдержки материала в печи. Исследование диффу-

зионных процессов на различных температурах позволило определить зависимость скорости роста интерметаллида. Основные результаты приведены на графике (рис. 6).

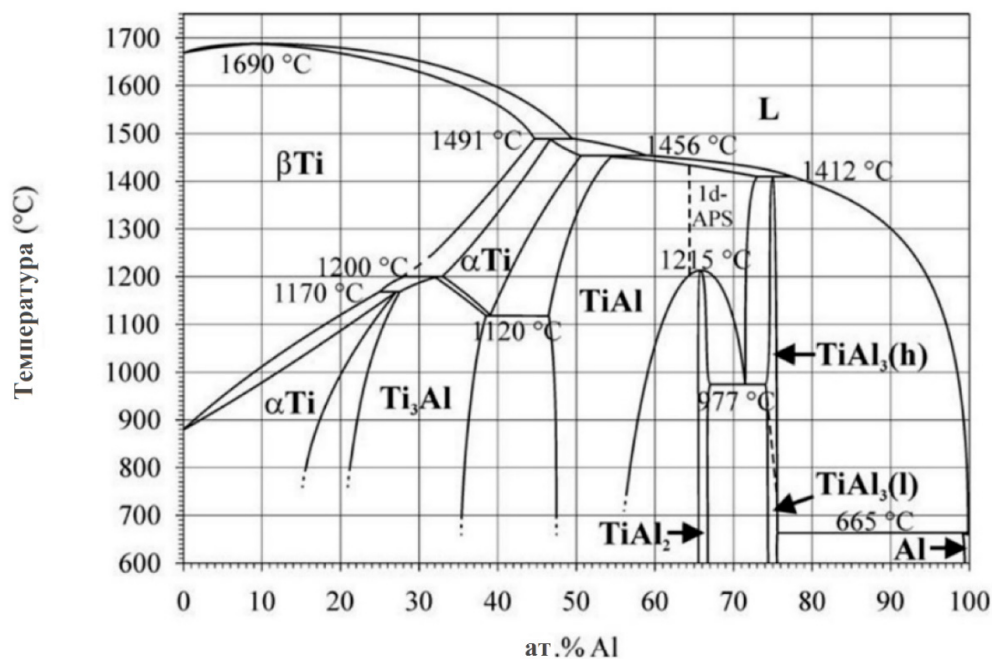


Рис. 5. Диаграмма состояний бинарной системы Ti–Al

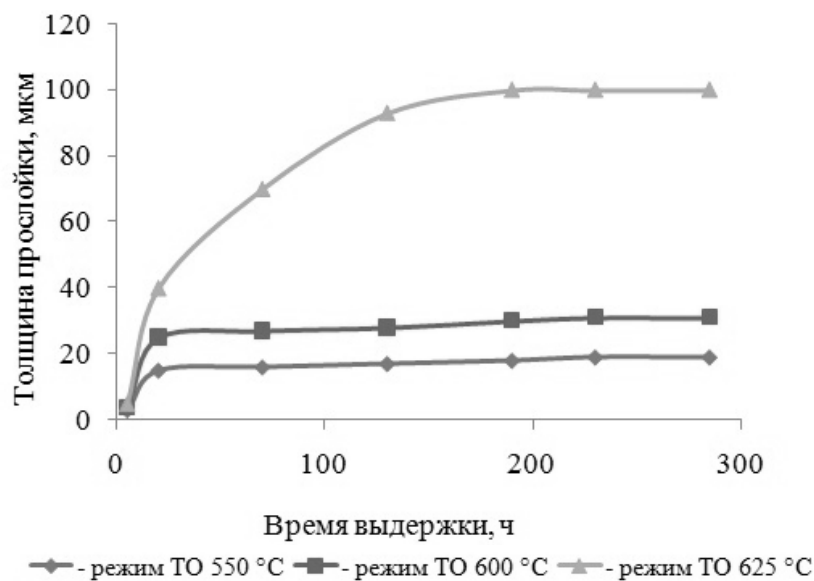


Рис. 6. Зависимость скорости роста интерметаллида

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что максимальная толщина прослойки интерметаллида порядка 90–100 мкм может быть получена при условии выдержки композита в печи с температурой

625 °С в течение 200 ч. Дальнейшая выдержка в печи не показывает существенного увеличения толщины слоя интерметаллида, что свидетельствует о существенном замедлении термодиффузионных процессов и обуславливает технологическую и экономическую целесообразность такого цикла термической обработки броневых композиционных материалов.

Исследование химического состава прослоек интерметаллида методом рентгенофазового анализа позволило идентифицировать их как соединение $TiAl_3$ [13]. На рис. 7 представлена микроструктура граничной зоны соединения композиционного гетерогенного материала, прошедшего термообработку.

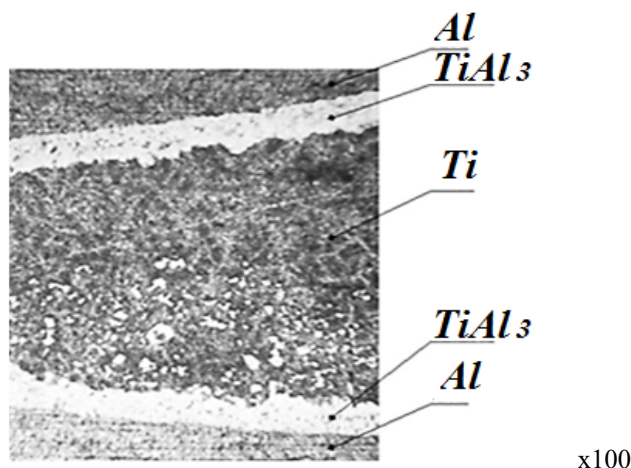


Рис. 7. Микроструктура граничной зоны соединения композиционного гетерогенного броневых материала

Обладая высоким значением твердости, сопоставимой с твердостью закаленной стали, интерметаллические $TiAl_3$ слои в составе композиционного гетерогенного материала будут способствовать гашению кинетической энергии баллистического объекта 1 тем самым фрагментируя его на более мелкие осколки 5, которые в свою очередь будут удерживаться высоковязкими алюминиевыми слоями металлической основы матрицы композита. Схема работы композиционной брони при наличии в ней интерметаллических слоев, приведена на рис. 8.

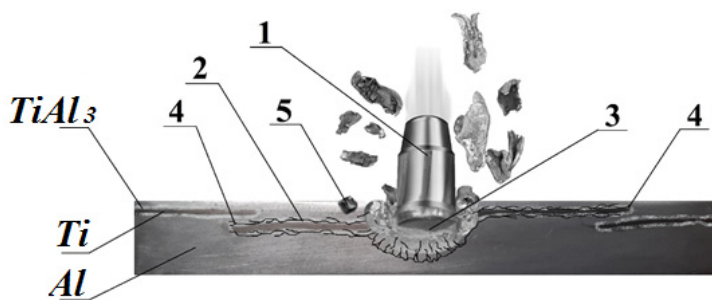


Рис. 8. Схема разрушения баллистического объекта при контакте с композиционным гетерогенным броневым материалом: 1 – баллистический объект; 2 – хрупкая трещина; 3 – точка контакта баллистического объекта с материалом; 4 – место локализации развития хрупкой трещины; 5 – осколок баллистического объекта

Данная схема носит условный характер и получена на основании результатов натурных испытаний по оценке пулестойкости композита на образцах размером 600×600 мм, скриншоты хода которых приведены на рис. 9. Съемка хода испытания производилась на высокоскоростную камеру Evercam 1000-16-M в монохромном формате со скоростью съемки 1000 к/с с разрешением 1280×800 пиксел.

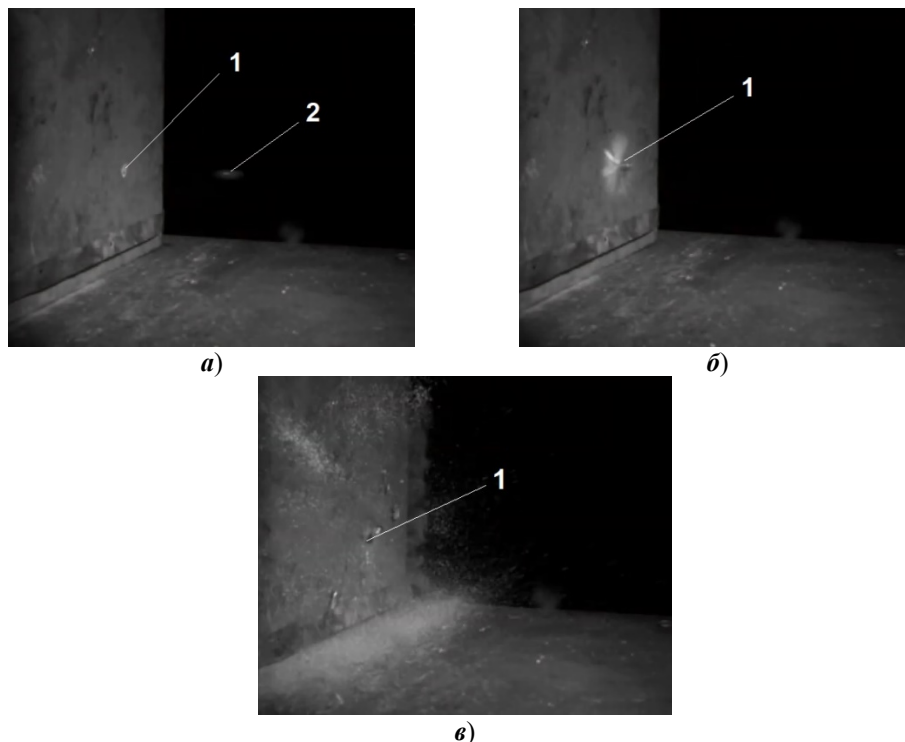


Рис. 9. Высокоскоростная съемка баллистических испытаний: *1* – точка контакта баллистического объекта с материалом; *2* – баллистический объект; *а* – стоп-кадр до встречи баллистического объекта с испытуемым образцом; *б* – стоп-кадр в момент встречи баллистического объекта с испытуемым образцом; *в* – стоп-кадр в момент разрушения баллистического объекта (непробитие)

На скриншотах (рис. 9,б,в) видно, что баллистический объект при контакте с композиционным гетерогенным броневым материалом разрушается с образованием большого количества осколков.

Наличие перфораций в промежуточных титановых слоях между основными слоями алюминиевой матрицы композита позволило локализовать механизм развития хрупких трещин при баллистическом воздействии на материал, тем самым повысив живучесть самой алюминиевой брони. При взаимодействии с баллистическим объектом *1* (см. рис. 8) в материале образуются хрупкие трещины, которые преимущественно формируются и растут в высокопрочных интерметаллических слоях *2*, расположенных вдоль границы соединения алюминия и титана. Эти трещины распространяются от точки контакта с баллистическим объектом *3* и, достигнув области перехода от края перфорации к зоне сварки вязкой металлической основы композитной

матрицы 4, останавливаются, что приводит к прекращению их дальнейшего развития. Последний факт обеспечивает условие выхода на максимально возможный уровень прочности соединения, соответствующий прочности металлической основы матрицы композита. Проведенные испытания по оценке прочности показали, что по сравнению с монометаллом матрицы основы композита увеличение прочности композита составило более 20 %.

Таким образом, разрабатываемый композиционный материал представляет собой многослойную композицию (рис. 10), состоящую из нечетного количества слоев. Требуемые характеристики материала обеспечиваются особенностью его структуры, представляющей собой чередование в определенной последовательности прочных титановых, высокотвердых интерметаллических и вязких алюминиевых слоев, а также контактом между слоями металлической матрицы композита через перфорации заданной геометрии в армирующих слоях. Упрочнение композиционного материала достигается как за счет наличия в схеме армирования перфораций, обеспечивающих высокопрочное соединение матрицы, так и за счет формирования в его структуре на границах матрицы и перфорированного армирующего элемента интерметаллических высокотвердых слоев регулируемой толщины последующей термической обработкой [4, 5].

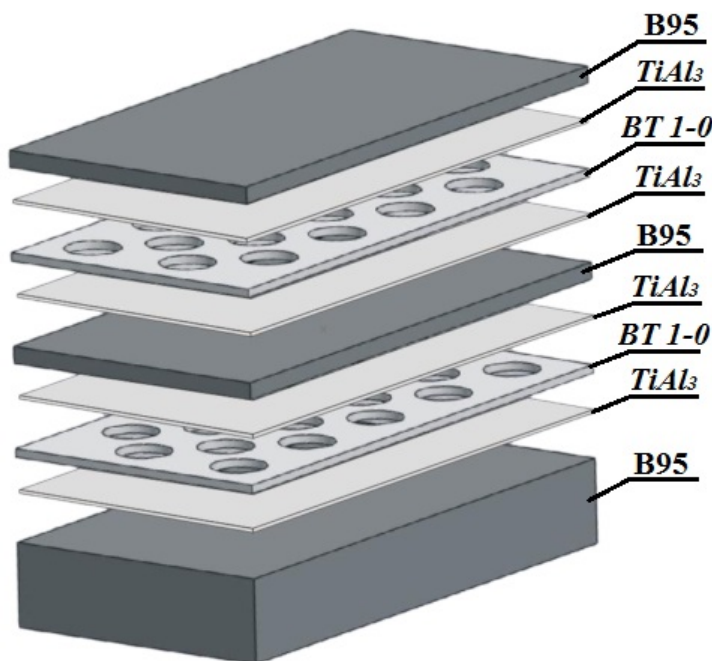


Рис. 10. Внешний вид модели композиционного гетерогенного броневых материала на основе сплавов титана и алюминия

Для оценки броневых характеристик композиционного материала были проведены оценочные испытания на пулестойкость экспериментальных образцов. Испытания проводились в Государственной испытательной станции Российской Федерации по испытаниям ручного огнестрельного оружия и патронов к нему и технических средств защиты (АО «ЦНИИТОЧМАШ», г. Москва).

Для проведения оценочных испытаний экспериментальных образцов композиционного броневых материала на пулестойкость допускается применение как ГОСТ Р 51112–97 «Средства защитные банковские. Требования по пулестойкости и методы испытаний», так и ГОСТ 34286–2017 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования» [14, 15]. Это возможно в связи с тем, что в данных нормативных документах предъявляются одинаковые требования к регламентированным средствам поражения, а также допускается проведение оценочных испытаний экспериментальных образцов.

При проведении испытаний допускается использование баллистических стволов или огнестрельного оружия, перечисленного в указанных нормативно-технических документах, имеющих аналогичные значения (оружию, перечисленному определяющих параметров – длина ствола, количество, глубина и угол наклона нарезов.

Испытания проводились в нормальных климатических условиях. Испытаниям подвергались экспериментальные образцы композиционных броневых материалов, прошедшие полный цикл термической обработки.

Размеры образцов для испытания на пулестойкость составляли 120×120 мм (рис. 11). Крестами на образцах обозначались места попадания соответствующих поражающих элементов.



Рис. 11. Внешний вид подготовленного для испытания на пулестойкость экспериментального образца композиционного броневых материала

Для оценки пулестойкости по классу защиты Бр3 образцы закреплялись на стенде неподвижно с углом встречи с пулей 90° . По классу защитной структуры БРЗ обстрел образцов производился с дальности $5 \pm 0,1$ м. Для оценки пулестойкости по классу защитной структуры Бр4 обстрел образцов производился с дальности $10 \pm 0,1$ м. Замер расстояния осуществлялся дальномером лазерным Leica D1S70 D8.

При обстреле производилось фиксирование скорости полета пуль V_3 , измеренной на расстоянии 3 м от дульного среза оружия. Замер скорости пули осуществлялся регистратором скорости полета пули РС-4М.

Обстрел экспериментальных образцов по классу защиты Бр3 производился баллистическим стволом пистолета Ярыгина (ПЯ) калибром 9 мм. Средствами поражения являлись патроны калибра 9×19 мм, инд. 7Н21 с пулей Пст, п. Г.83-13-539 (тип сердечника – стальной термоупрочненный). Характеристики поражающего элемента – масса 7,0 г; средняя скорость полета пуль $V_3 = 410 \pm 10$ м/с.

Обстрел экспериментальных образцов по классу защиты Бр4 производился баллистическим стволом автомата АКМ, калибр 7,62 мм. Средствами поражения являлись патроны калибра $7,62 \times 39$ мм, 57-Н-231, с пулей ПС (тип сердечника – стальной термоупрочненный). Характеристики поражающего элемента: масса 7,9 г, средняя скорость полета пуль $V_3 = 720 \pm 15$ м/с.

После каждого выстрела оценивался результат воздействия пули (Пробитие/Непробитие). Образец считают выдержавшим испытания, если отсутствуют сквозное пробитие образца, в том числе при скорости пули выше предельного значения, для данного типа баллистического ствола или огнестрельного оружия; следы пробития экрана-свидетеля вторичными поражающими элементами. Результаты оценочных испытаний на класс защитной структуры представлены в табл. 5 и 6 и на рис. 12 и 13.

Таблица 5

Результаты оценочных испытаний
по классу защиты по пулестойкости Бр3 по ГОСТ 34286–2017

Образец	Условия испытаний	Оружие	Средство поражения	V_3 , м/с	Результат
Образец № 1	Нормальные $T = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	Баллистический ствол калибра 9×19 мм	Патроны 9×19 мм инд. 7Н21, с пулей Пст	404	НЕпробитие

Таблица 6

Результаты оценочных испытаний
по классу защиты по пулестойкости Бр4 по ГОСТ 34286–2017

Образец	Условия испытаний	Оружие	Средство поражения	V_3 , м/с	Результат
Образец № 1	Нормальные $T = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	Баллистический ствол калибра $7,62 \times 35$ мм	Патроны $7,62 \times 39$ мм инд. 57-Н-231, с пулей ПС (ТУС)	731	Пробитие

Результаты оценочных испытаний показали, что при обстреле пяти-слойных экспериментальных образцов композиционных броневых материалов по классу защитной структуры Бр3 в нормальных климатических условиях пробития не получены патроном 9×19 мм, инд. 7Н21, с пулей Пст. Следовательно, образцы соответствуют классу защитной структуры Бр3.

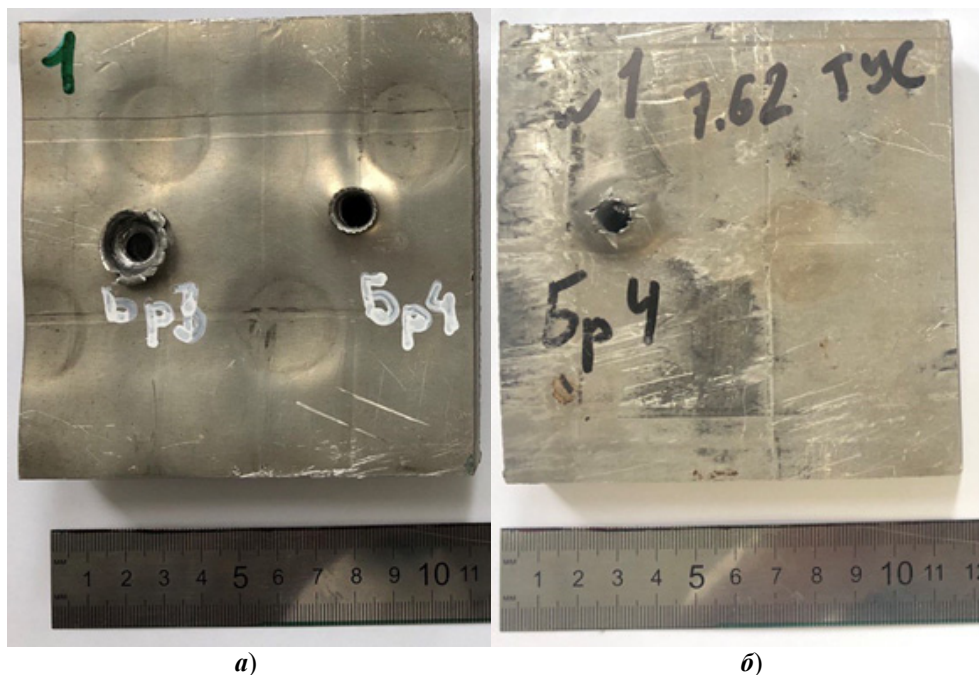


Рис. 12. Результат оценочных испытаний по классу защиты по пулестойкости Бр3 и Бр4 по ГОСТ 34286–2017 (вид сверху): *а* – лицевая сторона; *б* – тыльная сторона



Рис. 13. Результат оценочных испытаний по классу защиты по пулестойкости Бр3 и Бр4 по ГОСТ 34286–2017 (вид сбоку)

При оценочных испытаниях пятислойных экспериментальных образцов композиционных броневых материалов по классу защитной структуры Бр4 в нормальных климатических условиях получены пробития патроном 7,62 × 39 мм, инд. 57-Н-231, с пулей с пулей ПС (ТУС).

Согласно доступным данным для защиты экипажа бронированных машин от бронебойных пуль калибра 7,62 мм на практике толщина брони составляет порядка 40 мм и обстрел ведется с расстояния 75–150 м [2]. При оценочных испытаниях разработанного композиционного броневых материала толщиной 17 мм обстрел калибром 7,62 мм производился с расстояния 10 м, т.е. практически в упор. Данное обстоятельство свидетельствует о высокой боевой эффективности композиционного материала и предложенного

в нем нового способа армирования. Обеспечение необходимого уровня пулестойкости на расстоянии в 7 раз меньшем, чем в условиях обычного боевого взаимодействия, свидетельствует о высоких тактико-технических характеристиках брони и изделий, полученных на ее основе.

Для оценки весовых характеристик изделий на основе разработанного броневое гетерогенного материала, полученного сваркой взрывом, был произведен сравнительный расчет его веса для 1 м^2 площади. Также был произведен аналогичный расчет веса моноброни на основе броневое алюминиевого сплава В95, являющегося основой металлической матрицы разработанного гетерогенного материала.

С учетом того, что заданный уровень пулестойкости Бр3 моноброня на основе сплава В95 обеспечивает при толщине 22 мм и более, рассчитываем ее вес при данной толщине и получаем 59 кг. С учетом того, что разрабатываемый нами композиционный материал представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из листов сплава титана ВТ1-0 и металлической матрицы на основе броневое алюминиевого сплава В95 (состава В95 + ВТ1-0 + В95 + ВТ1-0 + В95) толщиной слоев 2 + 1 + 2 + 1 + 10 мм соответственно, а также того, что армирующие титановые слои имеют перфорации, площадь которых составляет около 50 % от площади самого листа, вес всей композиции толщиной 16 мм составил порядка 46 кг. Таким образом, суммарное снижение веса 1 м^2 разработанного броневое гетерогенного материала при этом составляет порядка от 20 до 25 % при условии сохранения заданного уровня пулестойкости Бр3.

Обработка экспериментальных данных в данной работе производилась с использованием традиционных статистических процедур – средств описательной статистики на основе выборочного метода.

Заключение

Проведен анализ научно-технической литературы. Показано, что традиционные монометаллические броневые материалы обладают рядом существенных недостатков, которые негативно влияют на тактико-технические характеристики изготовленных из них изделий. Основные из них – это значительный вес и большая толщина. В то же время композиционные неметаллические броневые материалы не способны противостоять многократным попаданиям в одну и ту же область конструкции из-за полного разрушения или расслоения. Предложена новая схема армирования композита с использованием технологии сварки взрывом. С помощью сварки взрывом был создан новый армированный композиционный материал на основе сплавов титана и алюминия. Были определены оптимальные параметры ударно-волнового воздействия, обеспечивающие получение композита необходимого качества, а также проведена оценка его прочности. Для улучшения тактико-технических характеристик материала было предложено формирование в его структуре высокотвердых интерметаллических слоев путем термической обработки. Установлены оптимальные режимы высокотемпературного отжига, которые позволяют создавать интерметаллические слои заданной толщины в структуре композита. Исследован фазовый состав интерметаллических прослоек и описан механизм, предотвращающий распространение хрупких трещин в материале при баллистическом воздействии на материал. Проведены испытания

на пулестойкость, которые показали, что разработанный композит соответствует классу защитной структуры Бр3. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенной схемы армирования композита. Это открывает возможности для создания новых типов броневых материалов, сочетающих высокую пулестойкость, конструкционную прочность и низкий удельный вес, что делает их пригодными для широкого спектра изделий.

Список литературы

1. Скляр В. А., Гребенников С. Ф. Бронетанковая техника: история, конструкция, применение. М. : Воениздат, 2005. 320 с.
2. Федосеев С. В. Боевые машины пехоты и бронетранспортеры. М. : Экспринт, 2003. 256 с.
3. Foss C. *Jane's Armour and Artillery*. 2020 ed. Jane's Information Group, 2020. 720 p.
4. Крюков Д. Б. Структурные особенности и технология получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 3. С. 103–111.
5. Крюков Д. Б. Перспективные легкие трещиностойкие брони, полученные с применением технологии сварки взрывом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18, № 10 (214). С. 440–443.
6. Крюков Д. Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2023. № 1 (25). С. 20–28.
7. Патент Российская Федерация № 2606134. Способ получения композиционного материала / Первухин Л. Б., Казанцев С. Н., Крюков Д. Б. [и др.]. Бюллетень № 16 от 10.01.2017.
8. Конон Ю. А., Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / под ред. В. М. Кудинова. М. : Машиностроение, 1987. 216 с.
9. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. М. : Металлургия, 1978. 166 с.
10. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. Минск : Наука и техника, 1990. 205 с.
11. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск : Наука, 1980. 220 с.
12. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение : учебник для высших учебных заведений. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
13. Pervukhin L. B., Kryukov D. B., Krivenkov A. O., Chugunov S. N. Structural Transformations and Properties of Titanium–Aluminum Composite during Heat Treatment // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118, № 8. P. 759–763.

References

1. Sklyarov V.A., Grebennikov S.F. *Bronetankovaya tekhnika: istoriya, konstruktsiya, primeneniye* = *Armored vehicles: history, design, application*. Moscow: Voenizdat, 2005:320. (In Russ.)
2. Fedoseev S.V. *Boevye mashiny pekhoty i bronetransportery* = *Infantry fighting vehicles and armored personnel carriers*. Moscow: Eksprint, 2003:256. (In Russ.)
3. Foss C. *Jane's Armour and Artillery*. 2020 ed. Jane's Information Group, 2020:720.
4. Kryukov D.B. Structural features and technology for producing lightweight armor composite materials with a mechanism for localizing brittle cracks. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal processing (technology, equipment, tools)*. 2022;24(3):103–111. (In Russ.)

5. Kryukov D.B. Promising lightweight crack-resistant armor produced using explosion welding technology. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2022;18(10):440–443. (In Russ.)
6. Kryukov D.B. Aspects of obtaining lightweight armor composite materials with a mechanism for localizing brittle cracks in the structure under ballistic impact. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii = Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Materials. Designs. Technologies*. 2023;(1):20–28. (In Russ.)
7. Patent Rossiyskaya Federatsiya № 2606134. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala = Method for producing composite material*. Pervukhin L.B., Kazantsev S.N., Kryukov D.B. et al. Bull. № 16 from 10.01.2017. (In Russ.)
8. Konon Yu.A., Konon Yu.A., Pervukhin L.B., Chudnovskiy A.D. *Svarka vzryvom = Explosive welding*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:216. (In Russ.)
9. Kudinov V.M., Koroteev A.Ya. *Svarka vzryvom v metallurgii = Explosive welding in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1978:166. (In Russ.)
10. Zakharenko I.D. *Svarka metallov vzryvom = Explosive welding of metals*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990:205. (In Russ.)
11. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom = Physics of explosive hardening and welding*. Novosibirsk: Nauka, 1980:220. (In Russ.)
12. Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy = Materials science: textbook for Higher Education Institutions*. Moscow: Mashinostroenie, 1990:528. (In Russ.)
13. Pervukhin L.B., Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Chugunov S.N. Structural Transformations and Properties of Titanium–Aluminum Composite during Heat Treatment. *Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(8):759–763.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Борисович Крюков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ddbbkk@yandex.ru

Dmitriy B. Kryukov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Алексей Олегович Кривенков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: krivenkov80@yandex.ru

Aleksey O. Krivenkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Максим Сергеевич Гуськов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: suralab@yandex.ru

Maksim S. Guskov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.08.2025

Принята к публикации / Accepted 10.09.2025

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материалы и методы. Результаты. Выводы) **и английском** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions) **языках**.

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисовочными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавитов должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные направления (группы специальностей):

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки)

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки)

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

2.3.2. Вычислительные системы и их элементы (технические науки)

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

2.5.9. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. +7 (8412) 64-32-89. E-mail: volgavuz@pnzgu.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата « ____ » _____ 20__ г.