

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

№ 1 (73)

2025

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Чигирев М. А., Бабич А. М.*
Эмоциональные агенты в имитации функционирования
сложных организационно-технических систем (Часть II)..... 5
- Бумажкина Н. Ю.* Подход к разработке архитектуры программного
комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных
машин виртуализированного центра обработки данных..... 16
- Волчихин В. И., Иванов А. И., Селиванов П. Е., Малыгина Е. А.*
Корректное тестирование качества работы
сверточных сетей искусственных нейронов, учитывающее
реальные условия их эксплуатации 29
- Дубенко Ю. В., Дышкант Е. Е., Демидов В. А.* Метод синтеза
и автоматической адаптации архитектуры
иерархической многоагентной системы 40
- Суминов К. А.* Метод выбора рационального состава функционального
программного обеспечения бортовых вычислительных систем
робототехнических комплексов в экстремальных условиях..... 55

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

- Ашанин В. Н., Коротков А. А.* Исследование влияния параметров
критических элементов и параметров ΣT -аналога-цифрового
преобразователя на линейность функции преобразования 67

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Игнатьев А. А., Добряков В. А., Ревякин В. А.* Обработка
виброизмерительной информации при автоматизации
распознавания катастрофического износа резца
по запасу устойчивости динамической системы..... 75
- Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е., Благоевич М., Васич М.* Моделирование
движения в циклоидальной передаче. Часть II. Нагруженная передача 92

Коновалов В. В., Донцова М. В., Расстегаев А. Н., Зайцев В. Ю. Оптимизация загрузки станков производственных участков изготовления деталей	106
Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И. Распределение припуска в зоне обработки на операциях проходного бесцентрового шлифования.....	117

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION**

ENGINEERING SCIENCES

№ 1 (73)

2025

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

- Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Chigirev M.A., Babich A.M.*
Emotional agents in modeling the functioning of complex
organizational and technical systems (Part 2) 5
- Bumazhkina N.Yu.* An approach to developing the architecture
of a software package to support the process of redevelopment
of virtual machines in a virtualized data center 16
- Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Selivanov P.E., Malygina E.A.*
Correct testing of the quality of convolutional networks of artificial
neurons, taking into account the real conditions of their operation 29
- Dubenko Yu.V., Dyshkant E.E., Demidov V.A.* Method of synthesis
and automatic adaptation of the architecture
of a hierarchical multi-agent system 40
- Suminov K.A.* A method for selecting the rational composition
of functional software for onboard computing systems
of robotic complexes under extreme conditions 55

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

- Ashanin V.N., Korotkov A.A.* Studying the influence of critical
parameters and elements of the Σ T-analog-to-digital converter
on the linearity of the conversion function 67

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

- Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Revyakin V.A.* Vibration measurement
information processing when automating recognition catastrophic
cutter wear by dynamic system stability margin 75
- Tchufistov E.A., Tchufistov O.E., Blagojević M., Vasic M.*
Simulation of motion in a cycloidal gear. Part II. Loaded gear 92

<i>Konovalov V.V., Dontsova M.V., Rasstegaev A.N., Zaitsev V.Yu.</i> Optimization of loading of machines in production areas for parts manufacturing.....	106
<i>Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I.</i> Allocation of allowances in the processing area for operations continuous centerless grinding.....	117

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

УДК 004.94

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

**Эмоциональные агенты в имитации функционирования
сложных организационно-технических систем (Часть II)**

М. Ю. Бабич¹, В. Е. Кузнецов², М. А. Чигирев³, А. М. Бабич⁴

^{1,2,3,4}Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

¹babichmj@mail.ru, ²69vek@mail.ru, ³chigirev@yandex.ru, ⁴fieryeye@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проведен анализ возможности использования эмоциональных агентов в моделях сложных организационно-технических систем двух групп; разработаны предложения по использованию эмоциональных агентов. Первая группа моделей – это детерминированные и стохастические модели (полная формализация процессов), вторая – модели с меньшей формализацией (Форсайт-метод, ситуационный анализ и др.). Имитация эмоциональных состояний актуальна для систем с неполной и неточной информацией, когда выбранные решения часто являются результатом эмоций и могут быть иррациональными. *Материалы и методы.* Рассматриваются методы, полностью формализующие эмоциональные процессы с привлечением современного математического аппарата; анализируется возможность имитации эмоций лишь с частичной формализацией. *Результаты.* Предлагается использовать имитацию возникновения эмоциональных состояний человека с помощью включения в модель определенных типов агентов. *Выводы.* Предложенное использование типов агентов позволяет учесть эмоции вследствие событий, произошедших задолго до рассматриваемого интервала моделирования в системах, находящихся вне контура моделируемой системы.

Ключевые слова: сложная организационно-техническая система, многоагентное моделирование, эмоциональное состояние, метод сценирования

Для цитирования: Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Чигирев М. А., Бабич А. М. Эмоциональные агенты в имитации функционирования сложных организационно-технических систем (Часть II) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 5–15. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-1

**Emotional agents in modeling the functioning
of complex organizational and technical systems (Part II)**

M.Yu. Babich¹, V.E. Kuznetsov², M.A. Chigirev³, A.M. Babich⁴

© Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Чигирев М. А., Бабич А. М., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

^{1,2,3,4}Research and Production Enterprise “Rubin”, Penza, Russia¹babichmj@mail.ru, ²69vek@mail.ru, ³chigirev@yandex.ru, ⁴fieryeye@yandex.ru

Abstract. *Background.* The following tasks are set in the work: analysis of the possibility of using emotional agents in SOS models of two groups; development of proposals for the use of emotional agents. The first group of models are deterministic and stochastic models (complete formalization of processes), the second are models with less formalization (Foresight method, situational analysis, etc.). Simulation of emotional states is relevant for systems with incomplete and inaccurate information, when the chosen decisions are often the result of emotions and can be irrational. *Materials and methods.* Methods that fully formalize emotional processes using modern mathematical apparatus and the possibility of simulating emotions with only partial formalization are considered. *Results.* It is proposed to use the imitation of the emergence of human emotional states by including certain types of agents in the model. *Conclusions.* The proposed use of agent types allows us to take into account emotions resulting from events that occurred long before the considered modeling interval in systems located outside the contour of the modeled system.

Keywords: complex organizational and technical system, multi-agent modeling, emotional state, game methods

For citation: Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Chigirev M.A., Babich A.M. Emotional agents in modeling the functioning of complex organizational and technical systems (Part II). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-1

Введение

Рассмотрим сложные организационно-технические системы (СОС), находящиеся в конкуренции. Выполняется

$$(\forall a^* \in A^*) \wedge (\forall a^{**} \in A^{**}) \wedge (A^* \cap A^{**} = \emptyset) \wedge \\ \wedge ((A^*, A^{**}, R) \subset S) \wedge (S \cap S' = \emptyset), \quad (1)$$

где a^* и a^{**} – два вида агентов; A – множество агентов (множество агентов из A^* находится в пункте управления и определяет цели агентам из A^{**}); R – ресурсы СОС; S' – система, аналогичная СОС, являющаяся конкурентом СОС S . Обобщенный алгоритм влияния эмоций на функционирование СОС может быть описан следующим образом:

$$a(t_s) \rightarrow E(t_s) \rightarrow d(t_s) \rightarrow U(t_s) \rightarrow E(t_{s+1}) \rightarrow d(t_{s+1}) \rightarrow U(t_{s+1}) \rightarrow \dots \\ \dots \rightarrow E(t_f) \rightarrow d(t_f) \rightarrow U(t_f), \quad (2)$$

где t_s и t_f – начало и конец временного интервала, который определен агенту a для достижения поставленной ему цели P_a . $a(t)$; $U(t)$, $d(t)$, $E(t)$ – состояние агента, среды, выбранное действие в момент времени t ; $E(t_i) = \{e^j(t_i)\}_{j=1}^m$ – последовательность эмоций, испытываемых агентом до времени t_i включительно.

Исследования, посвященные моделированию СОС, можно разбить на две группы. В исследованиях первой группы в большей степени присутствует формализация процессов (детерминированные и стохастические модели). Во

вторую группу входят модели с меньшей степенью формализации (метод сценирования, Форсайт-метод, ситуационный анализ, имитационное макетирование).

Во второй части работы ставятся задачи: анализ возможности использования эмоциональных агентов в моделях СОС; разработка предложений по использованию эмоциональных агентов.

Формализация эмоций для первой группы моделей

Для моделей первой группы необходимо полностью формализовать имитацию последовательности эмоций $E(t)$.

Работа [1] является одним из первых русскоязычных исследований, в котором рассматривалась формула возникновения эмоций (формула Симонова). Была введена сложно вычисляемая функция f , которая ставила в соответствие степени эмоции e силу потребности F и вероятность p удовлетворения потребности, зависящей от необходимых R_1 и имеющихся R_2 ресурсов агента:

$$e = f(F, p(R_1 - R_2)). \quad (3)$$

В дальнейшем формула Симонова обобщалась и использовалась в различных тематиках, например, в исследованиях влияния эмоций на принятие решений и взаимодействий роботов [2, 3]; для оценки поведения интеллектуальных систем [4].

В настоящее время в моделях первой группы широко используется архитектура BDI [5, 6], в основу которой положены ментальные составляющие: убеждение, желание, намерение. Другим направлением являются многомерные модели, где эмоции погружены в координатное многомерное пространство [7]. В них используются, например, два измерения: интенсивность–валентность, интенсивность–сходство (колесо Плутчика), – или три измерения: интенсивность, продолжительность, группа схожести [8].

Сложность и попытки обобщения процесса возникновения эмоций усложняют предлагаемые модели. Модель Экмана – Уолесса (теория универсальных базовых эмоций) [9] базируется на шести эмоциях: гнев, отвращение, страх, счастье, печаль, удивление. В книге [10] рассматривалась модель с привлечением 10 базовых эмоций. Модель СОС содержит две простые эмоции, четыре группы основных, четыре группы сложных эмоций [11].

В зависимости от поставленных задач в моделях широко используется современный математический аппарат: нечеткая математика, нейронные сети.

Следует отметить, что некоторые модели, по заявлениям авторов разработок, могут быть успешно использованы в специфических прикладных областях, а не только в качестве лабораторных исследований [12–14]. Тем не менее большинство разработанных моделей первой группы, несмотря на сложный математический аппарат, носят, скорее, лабораторный характер, т.е. рассматривают простые информационные и эмоциональные процессы. Например, в [15] используется гибридная модель $AV-AT$, моделирование проходит в два этапа с привлечением нечетких вычислений. Исследуется всего лишь новый метод включения эмоций в системы. В публикации [16] описывается сложная трехуровневая модель с использованием глубоких нейронных

сетей. Имитируется мимическое общение ребенка с матерью. В робототехнике эмоции включены в достаточно простые процессы роботов (например, [2] – убежать, питаться).

Возникают проблемы при взаимодействии различных *других* систем с моделируемой системой. В работах [17, 18] приведена следующая аксиома (аксиома принадлежности агента):

$$\forall a : ((\exists S_1, \exists S_2) \wedge (a \in S_1) \wedge (a \in S_2) \wedge (S_1 \neq S_2) \wedge (S_1 \not\subset S_2) \wedge (S_2 \not\subset S_1) \wedge (P_{S_1} \neq P_{S_2})), \quad (4)$$

где P_{S_1}, P_{S_2} – цели, поставленные системам S_1 и S_2 . То есть любой агент одновременно принадлежит более чем одной системе с несовместимыми целями, причем любая рассматриваемая система не входит в качестве подсистемы в другую систему. Например, для СОС агент-комбатант может входить одновременно в систему «Взвод» и систему «Семья». Эмоция, полученная в системе «Семья», может влиять на эмоции при достижении цели в системе «Взвод». Кроме того, процесс моделирования происходит во временном интервале $[t_s, t_f]$, однако в последовательности $E(t_i)$ могут присутствовать эмоции, возникающие вследствие событий, произошедших в *других* системах до t_s (например, эмоции, зависящие от врожденных рефлексий и пройденного обучения). *Другие* системы не входят в контур моделируемой системы и не учитываются.

Таким образом, при всей несомненной важности приведенных исследований они выполнены либо для специфических систем, либо носят лабораторный характер; существует ряд сложных проблем при имитации возникновения эмоций в последовательности E .

Имитация эмоций второй группы моделей

В моделях второй группы могут быть формализованы некоторые процессы, например, смещение летательного аппарата вследствие встречного ветра, но далеко не все. В них участвуют должностные лица (ДЛ), моделирующие действия агентов. Выбор возможного действия агента осуществляет человек, исходя из сложившейся ситуации. Возникающие ситуации являются игровыми, так как участвуют два множества агентов: свои и конкуренты, и цели у них являются противоположными. Игровые ситуации возникают в рамках метода сценирования, позволяющего выбрать действие агента при определенных ограничениях и имитировать последствия выбранного действия после имитации действий конкурентов. Формализация выбора действий агентов может отсутствовать у одного множества агентов (свои или конкуренты) или у обоих (свои и конкуренты). Вместо формализации выбор осуществляется человеком.

Казалось бы, если отсутствует формализация процессов, протекающих в СОС, то можно обойтись и без имитации возникновения эмоций, так как эмоции человека, возникающие в процессе игровых ситуаций, являются натуральными. Но они всего лишь имитируют реальные эмоции. Предположим, что моделируется функционирование реальной системы S_r . В этом случае в процессе моделирования агент-человек принадлежит одновременно си-

стеме S_1 – модели системы S_r , и S_2 – предприятию, где происходит моделирование, или коллективу разработчиков модели и т.д. То есть реальной системой для агента является система S_2 , отличная от S_r . Другими словами, агент находится вне моделируемой реальной системы S_r . Чувства и в модели S_1 , и в реальной системе S_2 отличаются от чувств в системе S_r . Например, чувство страха проигрыша в игровой ситуации отличается от реального чувства страха в реальной системе S_r .

Проблемы с интервалом $[t_s, t_f]$, описанные выше для моделей первой группы, имеют место и для моделей второй группы.

Тем не менее более целесообразно имитировать эмоциональное состояние человека в моделях второй группы, так как для моделей первой группы проблемы имитации эмоций накладываются на проблемы формализации процессов в СОС. Заметим, что в моделях второй группы используются сценарии, требующие от человека, участвующего в процессе имитации, выполнять необходимые и соответствующие сценарию действия.

Предложения по использованию эмоциональных агентов

Взаимодействие эмоций в последовательности E малоизучено. Влияние могут оказывать процессы, происходящие с человеком на протяжении всей его жизни, их последствия трудно определить в рассматриваемый временной интервал. Разные люди, попадая в одинаковые ситуации, переживают разные эмоциональные состояния.

Моделирование эмоций в СОС последовательностями $E(t_i)$ сталкивается с серьезными проблемами. Наиболее простой вариант – отказаться от всей последовательности $E(t_i)$, оставив лишь последнюю эмоцию $e^m(t_i)$. Тогда выбор действия агентом будет зависеть от оценки $U(t_{i-1})$ и эмоции $e^m(t_i)$. Вместо (2) получаем взаимосвязь, в которой присутствуют ее части вида

$$\dots \rightarrow U(t_{i-1}) \rightarrow e^m(t_i) \rightarrow d(t_i) \rightarrow U(t_i) \rightarrow \dots, \quad (5)$$

в качестве $e^m(t)$ можно брать различные базовые эмоции.

В этом случае, во-первых, агенты не отличаются друг от друга, их индивидуальность отсутствует. Если агенты в эмоциональном плане однородны, то имитируемые эмоции совпадают с эмоциями, являющимися следствием общественного сознания (группового, массового, институционального), но никак не индивидуального, хотя между ними существует взаимосвязь [19], которая важна именно в СОС, где каждый комбатант обязан выполнять достижение *своей* цели P_a всегда во взаимодействии и под влиянием социальной группы, в которой он находится. Влияние на возникающие эмоции одновременно как массового, так и индивидуального сознания не учитывается. Во-вторых, так как между агентами нет различий, то количество возможных вариантов для каждого агента увеличивается на $r^*(b-1)$, где r – количество допустимых действий; b – количество базовых эмоций (сравните количество базовых эмоций в модели СОС, приведенной выше).

Эмоция $e^m(t_i)$ зависит от последовательности

$$\{e^j(t_i)\}_{j=1}^{m-1}, \quad (6)$$

т.е. от того, что происходило с агентом до времени t_i . Последовательность (6) влияет не только на эмоцию $e^m(t_i)$, но и на самого агента: на его характер, опыт, способ и умение воздействовать на $U(t_i)$. Поэтому для преодоления возникших трудностей предлагается сопоставить последовательности (6) определенный тип агента $Type_k$ (k – номер типа) со своими индивидуальными свойствами, от которых зависит его эмоциональное состояние. Упростим модель и допустим, что $Type_k$ не зависит от времени, т.е. сам агент (его ментальные характеристики) не изменяется на интервале $[t_s, t_f]$. Тогда эмоция $e^m(t_i)$ является следствием оценки $U(t_{i-1})$ и типа агента. Эмоция $e^m(t_i)$ оказывает влияние на действие $d(t_i)$, но совместно с типом агента. Вместо (5) для каждого агента типа k получаем

$$\dots \rightarrow U(t_{i-1}) \rightarrow (Type_k, e^m(t_i)) \rightarrow d(t_i) \rightarrow U(t_i) \rightarrow \dots \quad (7)$$

Во-первых, тип $Type_k$ может вобрать в себя события, произошедшие до t_s и являющиеся причинами эмоций. Например, уверенность, приобретенную вследствие прошедшего обучения, или характер агента, складывающийся на протяжении его предыдущей жизни.

Во-вторых, агенты не являются эмоционально однородной массой, тип агента индивидуален. Можно имитировать, как агенты разных типов, попадая в одинаковые ситуации, проявляют разные эмоции $e^m(t_i)$.

В-третьих, нет необходимости рассматривать все количество b базовых эмоций. Для каждого конкретного случая можно отобрать лишь характерные эмоции для данного типа агента в складывающейся ситуации.

Реализацию (7) можно осуществить автоматной моделью, использованной для имитации темпераментов агентов [20, с. 83]. Аппаратная модель реализует смену тактик агентов при разных уровнях возбуждения и торможения для меланхолика, холерика, сангвиника, флегматика ($b = 4$).

Для понимания предложенной имитации эмоциональных агентов опишем условия моделирования СОС, выполненного в процессе разработки ее программного (ПО) и информационного обеспечения. СОС предназначалась для функционирования пункта управления системы охраны особо важного объекта, заключенного в замкнутую границу. Разработчиками была применена технология имитационного макетирования [21, 22]. Технология позволяла создавать имитационную модель процессов СОС, в которой взаимодействуют ПО реальной СОС и имитационное ПО (ИПО).

Рассмотрим лишь ИПО, которое моделирует деятельность агентов-нарушителей и функционирование подсистемы противодействия, пресекающей попытку нарушения (уничтожение агента-нарушителя). Подсистема не могла работать непрерывно и требовала периода восстановления своей боеспособности. Попытка нарушения осуществлялась одновременно некоторым количеством агентов-нарушителей либо волнами через определенное время. Нахождение, т.е. координаты подсистемы противодействия не были известны агентам-нарушителям. Результаты попыток фиксировались, и попытка могла быть повторена с учетом полученных знаний. Для нарушителя было возможно возникновение опасной ситуации: другой нарушитель в пределах расстояния l от агента-нарушителя уничтожен либо зафиксирован промах; $l \in [0, L]$, где L – некоторое предельное расстояние. Изменению тактики (выбранное действие $d(t)$) соответствовали варианты: нет изменения движения;

изменение траектории движения (движение к цели, но движение от заданной траектории на расстояние h); отказ от достижения цели (возвращение).

Приведем значения других параметров агентов:

- эмоция $e^m(t) = (\text{«Уверенность»}, \text{«Неуверенность»}, \text{«Испуг»})$;
- характер = («Смелый», «Осторожный», «Очень осторожный»);
- знание = («Не информирован», «Информирован с определенной степенью»);
- опыт = («Большой», «Средний», «Отсутствует»).

Уточним, что степень знания определялась количеством повторов завершённых попыток проникновения. Чем больше попыток, тем больше степень знания. Типы агентов ($Tурe_k$) определялись сочетанием характера, степенью знания и опыта.

Изменение тактики осуществлялось в соответствии с автоматной моделью [20]. Например, если агент «Смелый», знания «Не информированный», опыт «Средней», эмоция «Уверенность», то уход на расстояние l осуществлялся только после k_1 опасных ситуаций. Если агент «Очень осторожный», знания «Не информированный», опыт «Отсутствует», эмоция «Испуг», то уход на расстояние l осуществлялся после первой опасной ситуации ($k_2 = 1, k_2 \ll k_1$).

Моделировалось иррациональное действие, являющееся следствием стихийного массового поведения – паника: отказ от достижения цели при эмоции «испуг» у большинства агентов-нарушителей определенного типа.

Технология имитационного макетирования позволяет создавать как модели первой группы – полностью формализованные, так и модели второй группы – с участием должностного лица в качестве агента. Рассмотренная модель относилась к моделям второй группы. Должностные лица исполняли роль агентов-нарушителей в соответствии со сценарием типа нарушителя и возникающих эмоций.

Заключение

Предложенная имитация позволяет моделировать влияние эмоционального состояния агента на выбор возможного действия для достижения поставленной цели. Имитация основана на включении в модель системы типов агентов, определяющих его результирующую эмоцию, и позволяет учесть эмоции вследствие событий, произошедших задолго до рассматриваемого интервала достижения поставленной цели. Предлагается использовать имитацию эмоций для моделей второй группы.

Список литературы

1. Симонов П. В. Потребностно-информационная теория эмоций // Вопросы психологии. 1982. № 6. С. 44–50.
2. Карпов В. Э. Эмоции роботов. URL: <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/folder/rvkmzmfel/direct/51170801> (дата обращения: 02.05.2024).
3. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Влияния эмоций на принятие решения интеллектуальным роботом // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. № 3. С. 36–44.
4. Фоминых И. Б. Эмоции как аппарат оценок поведения интеллектуальных систем. URL: <https://studylib.ru/doc/163360/fominyh-i.b.-e-mocii-kak-apparat-ocenok-povedeniya?ysclid=lsnil8852w362774736> (дата обращения: 02.05.2024).

5. Bratman M. E. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987. 224 p.
6. Riahi H. L., Kebair F., Said L. B. Agent Decision-Making under Uncertainty: Towards a New E-BDI Agent Architecture Based on Immediate and Expected Emotions // *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2014. Vol. 6, № 3. P. 254–259.
7. Russell J. A. A Circumplex Model of Affect // *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980. Vol 39, № 6. P. 1161–1178.
8. Ковальчик З., Зубенко М. Вычислительные подходы к моделированию искусственных эмоций – Обзор предлагаемых решений. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2016.00021/full> (дата обращения: 02.04.2024).
9. Ekman P., Wallace F. V. Constants across cultures in the face and emotion // *Journal of personality and social psychology*. 1971. Vol. 17, № 2. P. 124–129.
10. Изард К. Э. *Психология эмоций*. СПб. : Питер, 2000. 464 с.
11. Ortony A., Clore G. L., Collins A. *The Cognitive Structure of Emotions*. New York : Cambridge, 1988. 207 p.
12. Заболевая-Зотова А. В., Петровский А. Б., Ульев А. Д. Распознавание и оценка взаимодействия людей по эмоциональным реакциям // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2023. № 4. С. 71–81.
13. Слостников С. А., Жукова Л. Ф., Семичаснов И. В. Приложение поиска, анализа и прогнозирования данных в социальных сетях // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. № 1. С. 97–108.
14. Осипов А. В., Сапожников А. Е., Плешакова Е. С., Гатауллин С. Т. Методы машинного обучения для распознавания эмоционального состояния абонента телекоммуникационных систем // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. № 1. С. 23–35.
15. Karyotisb Ch., Doctorb F., Iqbalb R., Jamesb A., Changa V. A fuzzy computational model of emotion for cloud based sentiment analysis. URL: https://pure.coventry.ac.uk/ws/portalfiles/portal/13277719/1_s2.0_S0020025517304164_main.pdf (дата обращения: 02.05.2024).
16. Hieida Ch., Horii T., Nagai T. Deep Emotion: A Computational Model of Emotion Using Deep Neural Networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.08447.pdf> (дата обращения: 02.05.2024).
17. Бабич М. Ю., Бабич А. М. Влияние аксиом принадлежности агентов нескольким организационно-техническим системам на рациональное поведение агентов // *Искусственные общества*. 2021. Т. 16, № 1. URL: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (дата обращения: 30.03.2024).
18. Бабич М. Ю. Искусственный интеллект и создание сложных организационно-технических систем. Часть II // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2022. № 1. С. 32–41.
19. Дубровский Д. И. Проблема сознания: опыт обзора основных вопросов и теоретических трудностей. Проблема сознания в философии и науке. М. : Канон+, 2009. С. 5–52.
20. Карпов В. Э., Карпова И. П., Кулинич А. А. *Социальные сообщества роботов*. М. : Ленанд, 2019. 352 с.
21. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Бабич А. М. Имитация особенностей автоматизированных систем управления для силовых структур в процессе моделирования их функционирования // *I-methods*. 2022. Т. 14, № 4. URL: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2022/4/1-babich4-2022.pdf> (дата обращения: 11.04.2023).
22. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Чигирев М. А., Ползунов Н. В. Онтология технологии включения метода сценирования в функционирование специализированных конкурирующих систем // *XXI+ век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2023. Т. 12, № 4 (64). С. 12–18.

References

1. Simonov P.V. Need-information theory of emotions. *Voprosy psikhologii = Issues of psychology*. 1982;(6):44–50. (In Russ.)
2. Karpov V.E. *Emotsii robotov = Robot emotions*. (In Russ.). Available at: <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/folder/rvkmtzmfel/direct/51170801> (accessed 02.05.2024).
3. Gorodetskiy A.E., Kurbanov V.G., Tarasova I.L. The influence of emotions on decision making by an intelligent robot. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision making*. 2023;(3):36–44. (In Russ.)
4. Fominykh I.B. *Emotsii kak apparat otsenok povedeniya intellektual'nykh system = Emotions as an apparatus for assessing the behavior of intelligent systems*. (In Russ.). Available at: <https://studylib.ru/doc/163360/fominykh-i.b.-e-mocii-kak-apparat-ocenok-povedeniya?ysclid=lsnil8852w362774736> (accessed 02.05.2024).
5. Bratman M.E. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987:224.
6. Riahi H.L., Kebair F., Said L.B. Agent Decision-Making under Uncertainty: Towards a New E-BDI Agent Architecture Based on Immediate and Expected Emotions. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2014;6(3):254–259.
7. Russell J.A. A Circumplex Model of Affect. *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980;39(6):1161–1178.
8. Koval'chik Z., Zubenko M. *Vychislitel'nye podkhody k modelirovaniyu iskusstvennykh emotsiy – Obzor predlagaemykh resheniy = Computational approaches to modeling artificial emotions – A review of proposed solutions*. (In Russ.). Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2016.00021/full> (accessed 02.04.2024).
9. Ekman P., Wallace F.V. Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of personality and social psychology*. 1971;17(2):124–129.
10. Izard K.E. *Psikhologiya emotsiy = Psychology of emotions*. Saint Petersburg: Piter, 2000:464. (In Russ.)
11. Ortony A., Clore G.L., Collins A. *The Cognitive Structure of Emotions*. New York: Cambridge, 1988:207.
12. Zaboloeva-Zotova A.V., Petrovskiy A.B., Ul'ev A.D. Recognizing and assessing human interactions based on emotional reactions. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision making*. 2023;(4):71–81. (In Russ.)
13. Slastnikov S.A., Zhukova L.F., Semichasnov I.V. Social media data search, analysis and forecasting application. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technology and computing systems*. 2024;(1):97–108. (In Russ.)
14. Osipov A.V., Sapozhnikov A.E., Pleshakova E.S., Gataullin S.T. Machine learning methods for recognizing the emotional state of a subscriber of telecommunication systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technology and computing systems*. 2024. № 1. S. 23–35.
15. Karyotisb Ch., Doctorb F., Iqbalb R., Jamesb A., Chang V. *A fuzzy computational model of emotion for cloud based sentiment analysis*. Available at: https://pure.coventry.ac.uk/ws/portalfiles/portal/13277719/1_s2.0_S0020025517304164_main.pdf (accessed 02.05.2024).
16. Heida Ch., Horii T., Nagai T. *Deep Emotion: A Computational Model of Emotion Using Deep Neural Networks*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1808.08447.pdf> (accessed 02.05.2024).
17. Babich M.Yu., Babich A.M. The influence of axioms of belonging of agents to several organizational and technical systems on the rational behavior of agents. *Iskusstvennye obshchestva = Artificial societies*. 2021;16(1). (In Russ.). Available at: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (accessed 30.03.2024).

18. Babich M.Yu. Artificial intelligence and creation of complex organizational and technical systems. Part 2. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):32–41. (In Russ.)
19. Dubrovskiy D.I. *Problema soznaniya: opyt obzora osnovnykh voprosov i teoreticheskikh trudnostey. Problema soznaniya v filosofii i nauke = The issue of consciousness: an essay on the review of fundamental issues and theoretical difficulties. the problem of consciousness in philosophy and science.* Moscow: Kanon+, 2009:5–52. (In Russ.)
20. Karpov V.E., Karpova I.P., Kulinich A.A. *Sotsial'nye soobshchestva robotov = Social communities of robots.* Moscow: Lenand, 2019:352. (In Russ.)
21. Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Babich A.M. Simulation of the features of automated control systems for law enforcement agencies in the process of modeling their functioning. *I-methods.* 2022;14(4). (In Russ.). Available at: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2022/4/1-babich4-2022.pdf> (accessed 11.04.2023).
22. Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Chigirev M.A., Polzunov N.V. Ontology of technology for including the scenario method into the functioning of specialized competing systems. *XXI+ vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = The 21st century: results of the past and problems of the present plus.* 2023;12(4):12–18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Бабич

доктор технических наук, доцент,
главный специалист научно-
технического центра, Научно-
производственное предприятие
«Рубин» (Россия, Пенза,
ул. Байдукова, 2)

E-mail: babichmj@mail.ru

Mikhail Yu. Babich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, key specialist of the Scientific
and Technical Center, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Вячеслав Ефимович Кузнецов

кандидат технических наук, начальник
научно-технического центра,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: 69vek@mail.ru

Vyacheslav E. Kuznetsov

Candidate of engineering sciences,
head of the Scientific and Technical Center,
Research and Production Enterprise
“Rubin” (2 Baydukova street, Penza,
Russia)

Михаил Александрович Чигирев

заместитель начальника отделения
научно-технического центра,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: michael-chigirev@yandex.ru

Mikhail A. Chigirev

Deputy head of division of the Scientific
and Technical Center, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Андрей Михайлович Бабич

кандидат технических наук, программист
научно-технического центра,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: fieryeye@yandex.ru

Andrey M. Babich

Candidate of engineering sciences,
software engineer of the Scientific
and Technical Center, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 12.09.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.10.2024

Принята к публикации / Accepted 21.12.2024

УДК 004.051

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-2

Подход к разработке архитектуры программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин виртуализированного центра обработки данных

Н. Ю. Бумажкина

Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, Россия
orui@mvd.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Распределенность разработанной системы поддержки обусловлена необходимостью получения параметров машин виртуальных и физических виртуализированного центра обработки данных (ЦОД) с учетом локальной или территориальной распределенности их серверных платформ. *Материалы и методы.* При разработке архитектуры программного комплекса использовалась парадигма «менеджер-агенты». При этом для поддержки кроссплатформенности сервисного программного обеспечения виртуализированного ЦОД рассмотрена возможность совместимости с интерфейсами прикладного программирования существующих распределенных систем мониторинга, таких как Zabbix, NetCrunch, OpenNMS и др. *Результаты.* Проведена экспериментальная оценка эффективности программного комплекса перераспределения виртуальных машин виртуализированного ЦОД. *Выводы.* Сформированная система поддержки отличается возможностью расширения и высокой адаптивностью к условиям современных виртуализированных ЦОД.

Ключевые слова: виртуализированный центр обработки данных, архитектура программного комплекса, виртуальная машина, имитационная модель

Для цитирования: Бумажкина Н. Ю. Подход к разработке архитектуры программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин виртуализированного центра обработки данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 16–28. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-2

An approach to developing the architecture of a software package to support the process of redevelopment of virtual machines in a virtualized data center

N.Yu. Bumazhkina

Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation, Orel, Russia
orui@mvd.ru

Abstract. *Background.* The distribution of the developed support system is due to the need to obtain the parameters of virtual and physical machines of a virtualized data center (DPC), taking into account the local or territorial distribution of their server platforms. *Materials and methods.* When developing the architecture of the software package, the “manager-agents” paradigm was used. At the same time, to support cross-platform service software of a virtualized data center, the possibility of compatibility with application programming interfaces of existing distributed monitoring systems such as Zabbix, NetCrunch, OpenNMS, etc. is considered. *Results.* An experimental evaluation of the effectiveness of the software package for relocating virtual machines in a virtualized data center has been

carried out. Conclusions. The formed support system is expandable and highly adaptable to the conditions of modern virtualized data centers.

Keywords: virtualized data center, software package architecture, virtual machine, simulation model

For citation: Bumazhkina N.Yu. An approach to developing the architecture of a software package to support the process of redevelopment of virtual machines in a virtualized data center. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):16–28. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-2

Введение

В настоящее время наблюдается увеличение объема обрабатываемых данных, что приводит к повышенному спросу на использование методов и технологий развития интеллектуального анализа данных [1, 2]. Одним из современных направлений в развитии этих методов является применение алгоритмов искусственного интеллекта, обусловленное необходимостью работы с большими данными и решения сложных вычислительных задач.

Технологической основой применения методов интеллектуального анализа данных выступает использование мощностей центра обработки данных (ЦОД). По мере роста объема данных, нуждающихся в обработке, увеличивается потребность в более мощных вычислительных и коммуникационных ресурсах [3, 4].

Важной задачей, решаемой системой администрирования ЦОД, является оптимизация использования их вычислительных и коммуникационных ресурсов. Одним из способов такой оптимизации является применение систем виртуализации этих ресурсов [5]. Центры обработки данных, использующие системы виртуализации, называются «виртуализированные центры обработки данных» [6].

Подход к предоставлению пользовательских услуг через виртуализацию в общем виде показан на рис. 1, он включает четыре взаимосвязанных уровня иерархии ЦОД [7].

Первый уровень включает вычислительные и коммуникационные ресурсы ЦОД, представленные множеством физических машин, чьи ресурсы распределяются виртуальным машинам в соответствии с их запросами.

Второй уровень – это виртуализация данных ресурсов, где многочисленные виртуальные машины используют выделенные гипервизорами ресурсы для установки необходимого пользователю программного обеспечения. Виртуализированные ЦОД, разработанные на основе одного вида гипервизоров, именуются гомогенными, а использующие разные виды гипервизоров – гетерогенными.

Третий уровень представляет программное обеспечение, с которым непосредственно взаимодействует пользователь.

Четвертый уровень – это уровень самих пользователей, которые получают в распоряжение услуги и сервисы с нужным качеством в рамках соглашения об уровне обслуживания. Программное обеспечение может изменять запросы на виртуализированные ресурсы, влияя на потребность в физических ресурсах. Виртуальные машины поддерживают гибкость запросов на вычислительные и коммуникационные ресурсы, но изначальная настройка на

уровне физических машин может не соответствовать изменяющимся потребностям. Увеличение ресурсов сверх выделенного объема невозможно, что снижает эффективность виртуализованного ЦОД.

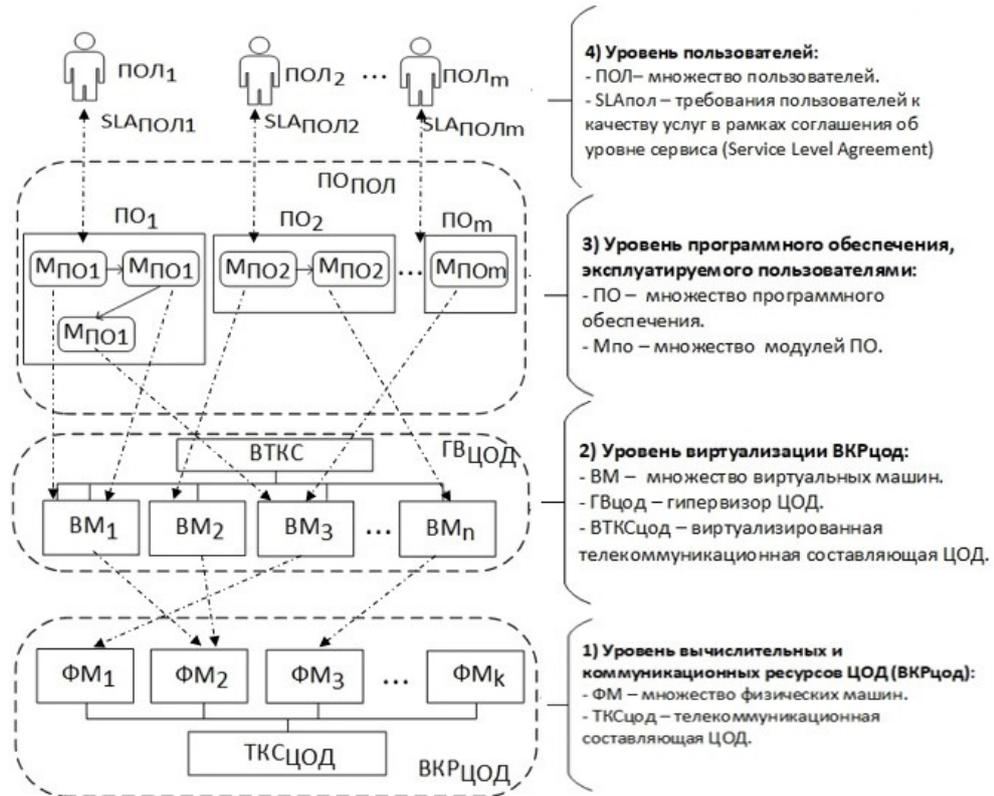


Рис. 1. Принцип динамического распределения вычислительных и коммуникационных ресурсов на основе технологии их виртуализации

Одним из способов решения задачи динамического распределения и перераспределения виртуализированных ресурсов является «переразмещение» виртуальных машин [8].

Основной способ переразмещения виртуальных машин – живая миграция, позволяющая переносить работающие виртуальные машины между физическими машинами без прерывания работы [9].

Алгоритмы живой миграции виртуальных машин (предварительное копирование (pre-cory) и последующее копирование (post-cory)) выполняются по плану, разработанному службой управления виртуализованного ЦОД. Результатом планирования является бинарная матрица миграции виртуальных машин, где единица означает размещение виртуальной машины на физической, а ноль – отсутствие размещения [10, 11]. В небольших ЦОД матрица создается вручную администратором, в крупных – автоматизируется. Формирование матрицы позволяет не только переразмещать виртуальные машины, но и оптимизировать процесс, освобождая ресурсы и снижая энергопотребление.

В данной статье предлагается подход к разработке архитектуры программного комплекса поддержки процесса перераспределения виртуальных машин виртуализированного ЦОД на основе полученных результатов проведенных ранее исследований [12].

Виртуализированный ЦОД предлагается рассматривать как распределенную систему, поскольку он соответствует следующим ее характеристикам:

- 1) совместное использование ресурсов;
- 2) открытость;
- 3) параллелизм;
- 4) масштабируемость;
- 5) отказоустойчивость;
- 6) прозрачность;
- 7) гетерогенность.

В свою очередь под распределенной системой понимается группа автономных компьютеров, физически разделенных, но объединенных сетью и управляемых программным обеспечением [13]. Компьютеры взаимодействуют, делятся ресурсами, файлами и выполняют задачи.

Система поддержки перераспределения виртуальных машин в виртуализированном ЦОД относится к распределенным системам, учитывающим локальную и/или территориальную распределенность серверных платформ. Для разработки архитектуры рекомендуется использовать парадигму «менеджер-агенты» и специализированную двухуровневую архитектуру, изображенную на рис. 2.

Уровнями архитектуры разработанной распределенной системы поддержки перераспределения виртуальных машин на основе парадигмы «менеджер-агент» являются:

1. Уровень агентов – программных модулей, взаимодействующих с гипервизорами виртуализированного ЦОД и вышележащим уровнем. Функциями модуля-агента являются: получение данных от гипервизора о его типе, значениях наличия и остатка ресурсов, количестве активных виртуальных машин, потребности активных виртуальных машин в ресурсах.

2. Уровень менеджмента – программных модулей:

– формирование гомогенных подмножеств физических машин по типу используемых гипервизоров;

– формирование значений векторов ВНР (вектор наличия ресурсов), ВОР (вектор оставшихся ресурсов), ВВР (вектор выделения ресурсов) для подмножеств g_1 и g_2 [12];

– выполнение расчета значений множества векторов ВДР (вектор дисбаланса ресурсов) для подмножеств g_1 и g_2 [12];

– запуск копий модуля расчета матриц миграции ММГ для подмножеств g_1 и g_2 [12];

– формирование на основе рассчитанных матриц миграции планов миграции подмножеств g_1 и g_2 и передачи их уровню агентов.

Парадигма «менеджер-агент» распределяет задачи сбора и обработки данных между узлами системы, повышая гибкость и масштабируемость. Центральный менеджер координирует агентов, размещенных на серверных платформах. Агенты собирают данные о виртуальных и физических машинах

в локальных узлах и передают их менеджеру, который агрегирует и анализирует информацию, обеспечивая целостное представление о системе для оперативного выявления и устранения проблем.

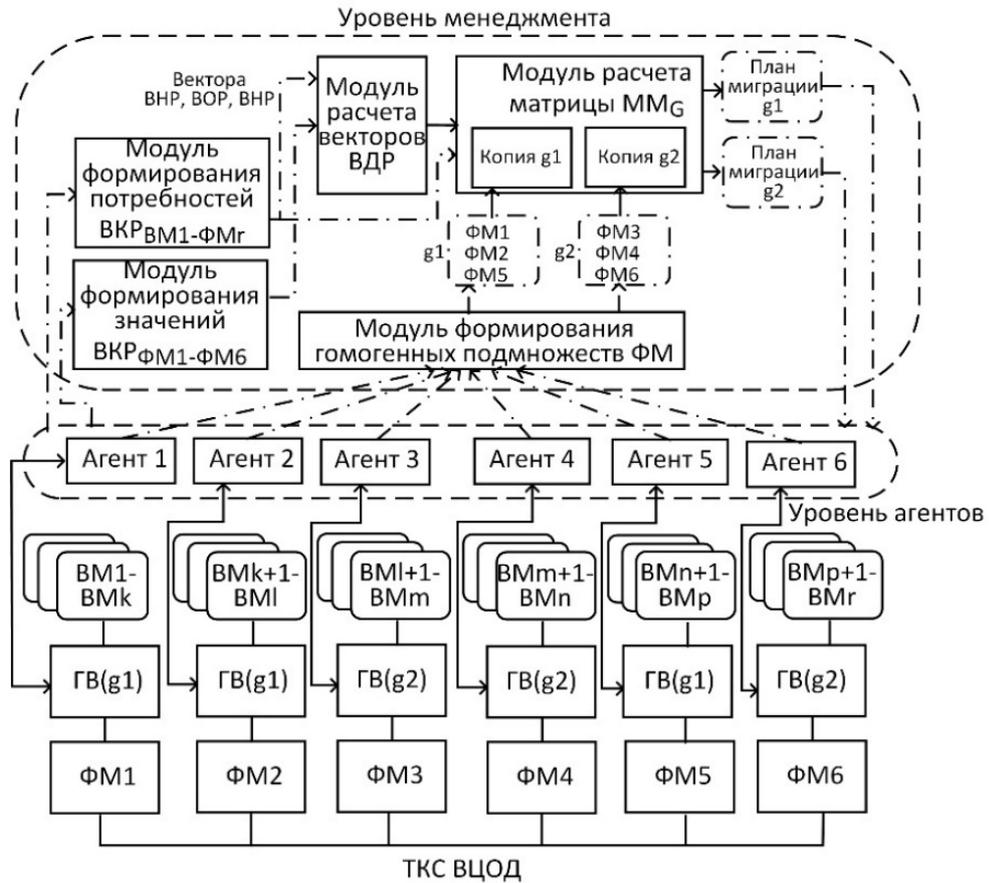


Рис. 2. Архитектура программного комплекса поддержки процесса переразмещения виртуальных машин на основе парадигмы «менеджер-агент»

Также данная парадигма обеспечивает высокую производительность, точность сбора данных и отказоустойчивость системы: при выходе агента из строя задачи перенаправляются другим агентам. Архитектура позволяет легко масштабировать систему за счет добавления новых серверов и агентов без значительных изменений в логике менеджера, что делает расширение быстрым и малозатратным.

Агенты для сбора данных, включая мониторинг оборудования и ресурсов, разработаны с учетом кроссплатформенности, поддерживают установку на различные операционные системы и аппаратные платформы. Это достигнуто за счет универсальных API, обеспечивающих интеграцию с существующими системами мониторинга.

Благодаря открытым интерфейсам и протоколам была обеспечена совместимость с такими системами, как Zabbix, NetCrunch, OpenNMS и др., что существенно упрощает интеграцию и позволяет снизить затраты на внедре-

ние системы поддержки [14]. Используя эти интерфейсы, менеджер может получить доступ к данным, уже собранным и обработанным текущими системами мониторинга, что исключает дублирование функций и значительно повышает эффективность работы.

Программные модули для распределенной системы поддержки перераспределения виртуальных машин предлагается реализовать на фреймворке PySyncObj, обеспечивающем интеграцию с системами мониторинга. Модули на уровне агентов собирают данные в реальном времени, взаимодействуя с уровнем менеджмента для непрерывного функционирования [15]. Уровень менеджмента отвечает за стратегическое планирование миграции виртуальных машин, используя векторы ВНР, ВОР и ВВР для адаптации к изменениям конфигурации ресурсов. Результаты расчетов матриц миграции передаются на уровень агентов для выполнения, обеспечивая гибкость, эффективность перераспределения виртуальных машин и оптимизацию использования ресурсов.

Разработка структуры имитационной модели гетерогенного виртуализированного центра обработки данных

Для оценки работоспособности и эффективности разработанного алгоритма необходимо решить задачу синтеза сложной системы с использованием средств компьютерного моделирования. Наилучшим выбором является применение инструментов имитационного моделирования как наиболее распространенного подхода [16, 17]. Цель моделирования – получение количественных (значения переменных) и качественных (свойства системы) результатов. Создание компьютерной модели требует учета всех внутренних связей объекта и точного отражения его факторов, что делает задачу сложной. Необходимо проанализировать доступные инструменты имитационного моделирования для решения поставленных задач.

В настоящее время на рынке программного обеспечения для имитационного моделирования представлено множество различных продуктов, разработчики которых предлагают широкий спектр систем для различных методов имитационного моделирования [17]. Обзор современных методов имитационного моделирования представлен в табл. 1.

Таблица 1

Программное обеспечение для имитационного моделирования

Методы имитационного моделирования	Программные инструменты имитационного моделирования
Дискретно-событийное моделирование	GPSS, AnyLogic, Arena, Extend, PowerSim Studio, ProModel, Pilgrim, SimScript, FlexSim и др.
Системная динамика	AnyLogic, Arena, SimBioSys, eMPlant, Plant Simulation, SimuLab, VenSim, Pilgrim, Dynamo, Stella и др.
Агентное моделирование	AnyLogic, SimAgent, SimBioSys, AgentSpeak, TeleScript, RePast, NetLogo, Mason и др.

В связи с тем, что для архитектуры программного обеспечения, предназначенного для содействия перераспределению виртуальных машин, была выбрана парадигма «менеджер-агент», решение в пользу среды моделирова-

ния было принято в сторону продукта разработки российских специалистов – AnyLogic, разработка компании The AnyLogic Company. Эта платформа предоставляет возможность моделирования систем различных видов, включая дискретное событийное моделирование, системную динамику и агентное моделирование, что делает ее универсальным инструментом для решения широкого круга задач [18, 19].

Данная платформа для имитационного моделирования обладает множеством преимуществ: встроенные библиотеки, необходимые для научных исследований, поддержка программирования на Java для создания уникальных свойств объектов и классов, удобный и интуитивно понятный графический интерфейс, обширные примеры моделей и полноценная документация. Платформа также характеризуется гибкостью и наличием мощных аналитических инструментов.

Проектирование структуры имитационной модели гетерогенного виртуализированного центра обработки данных

Конструкция модели имитации для виртуализированного ЦОД с гетерогенной структурой включает следующие модули (генераторы компонентов структуры ЦОД):

1. Модуль генерации параметров ЦОД.
2. Модуль генерации параметров кластера.
3. Модуль генерации параметров виртуальных машин.
4. Модуль генерации параметров живой миграции.

В модуле генерации «Параметры ЦОД» создается количество кластеров физических машин, которые представлены как кластеры серверов, поскольку живая миграция виртуальных машин происходит только внутри одного кластера.

В модуле генерации «Параметры кластера» для физических машин указывается количество серверов и пропускная способность кластера. При этом в каждом сервере создаются ресурсы: С (процессор), М (RAM).

Тип ГВ (g_1 , g_2) представлен типом алгоритма живой миграции – g_1 – это Pre-copy; g_2 – это Post-copy.

В модуле генерации «Параметры виртуальных машин» задается количество виртуальных машин с запрашиваемыми/потребляемыми ресурсами: С (CPU), М (RAM). Для каждой виртуальной машины генерируются разные по объему ресурсы.

В модуле генерации «Параметры живой миграции» реализованы два алгоритма живой миграции виртуальных машин (Pre-copy и Post-copy) на основе результатов анализа [7] и три алгоритма перераспределения ресурсов ЦОД:

- 1) на основе метода XEN SandPiper – XEN SandPiper;
- 2) на основе метода вычисления нагрузки виртуализированного сервера (МНВС);
- 3) разработанный алгоритм перераспределения виртуальных машин ЦОД на основе метаэвристики ACS (МП ВМ ЦОД).

Принципы перераспределения ресурсов, реализованные в алгоритмах XEN SandPiper и МНВС рассмотрены в [12].

Вид интерфейса настройки структуры виртуализированного ЦОД в разработанной имитационной модели представлен на рис. 3.

The interface is divided into four main sections:

- Параметры ЦОД (DC Parameters):** Includes 'Количество кластеров' (2), 'Режим генерации' (manual/auto), and a 'generate' button.
- Параметры кластера (Cluster Parameters):** Includes '№ кластера' (кластер1), 'Имя кластера' (кластер1), 'Количество серверов' (5), 'Пропускная способность' (1000 Mb/s), '№ сервера' (сервер1), 'CPU' (5), 'RAM' (64 | 256), and buttons for 'generate', 'save', 'DataBase', and 'GEN_SERVER'.
- Параметры ВМ (VM Parameters):** Includes 'Режим генерации' (single_mode/multi_mode), 'Количество ВМ' (10), 'CPU' (4 | 8), 'RAM' (4 | 32), and buttons for 'generate', 'save', 'DataBase_VM', 'id_server', 'id_VM', and 'install_VM'.
- Параметры ЖМ (Hypervisor Parameters):** Includes 'Алгоритм миграции' (Pre-copy/Post-copy), 'Режим миграции' (Consistent/Parallel), 'Server_Source' (0), 'Server_Destination' (0), 'Name_VM', 'Count_hope', 'preinstall', 'migrate', 'Алгоритм распределения ВМ' (XEN SandPiper/MHBC/МП ВМ ЦОД), and a 'Distribute' button.

Additional buttons at the bottom include 'Clean_db' and 'main menu'.

Рис. 3. Интерфейс настройки структуры виртуализированного центра обработки данных

Результаты проведения имитационного эксперимента

Для оценивания результата работы алгоритма перераспределения виртуальных машин в виртуализированном ЦОД с различной структурой и степенью гетерогенности в рамках разработанной имитационной модели был спланирован сравнительный имитационный эксперимент. Эффективность работы разработанного алгоритма перераспределения виртуальных машин сравнивается с алгоритмом XSP и алгоритмом VSL.

При каждом прогоне имитационного эксперимента входные параметры создавались случайным образом генераторами нагрузки имитационной модели: количество физических машин, тип гипервизора каждой физической машины, начальные значения ресурсов каждой физической машины, количество виртуальных машин, запущенных на каждой физической машине, начальное значение ресурсов, используемых каждой виртуальной машиной.

Вид интерфейса сгенерированных параметров прогона имитационной модели представлен на рис. 4. Исследуемые алгоритмы перераспределения виртуальных машин подключались к модели через AnyLogic Python API (библиотека AnyLogic Cloud).

Степень гетерогенности виртуализированного ЦОД определяется фиксированным коэффициентом гетерогенности $K_{\text{гет}} = \{0; 0,5\}$ – соотношения физических машин с гипервизорами: Xen – g_1 и KVM – g_2 . Если $K_{\text{гет}} = 0$, то виртуализированный ЦОД полностью гомогенный (с гипервизором Xen или KVM), а если $K_{\text{гет}} = 0,5$, то виртуализированный ЦОД максимально гетерогенный (50 физических машин с гипервизором Xen и 50 физических машин с гипервизором KVM).

Имитационный эксперимент имитирует нагрузку на виртуализированный ЦОД с использованием случайно определяемого числа виртуальных машин и их параметров. Цель – оценить предельные возможности и слабые места алгоритма перераспределения виртуальных машин при масштабировании инфраструктуры. С ростом числа физических машин нагрузка на алгоритм возрастает, что может снизить его производительность и эффективность.



Рис. 4. Интерфейс генерации параметров и переменных имитационного прогона

Эффективность работы алгоритма перемещения виртуальных машин в виртуализированном ЦОД определяется коэффициентом использования физических машин. Этот коэффициент демонстрирует соотношение количества неиспользуемых физических машин к их общему числу в кластере. Для каждого уровня гетерогенности будет выполняться 10 прогонов перед применением алгоритмов перераспределения ресурсов и 10 прогонов после.

Усредненные результаты проведенных экспериментов имитационной модели представлены на рис. 5.

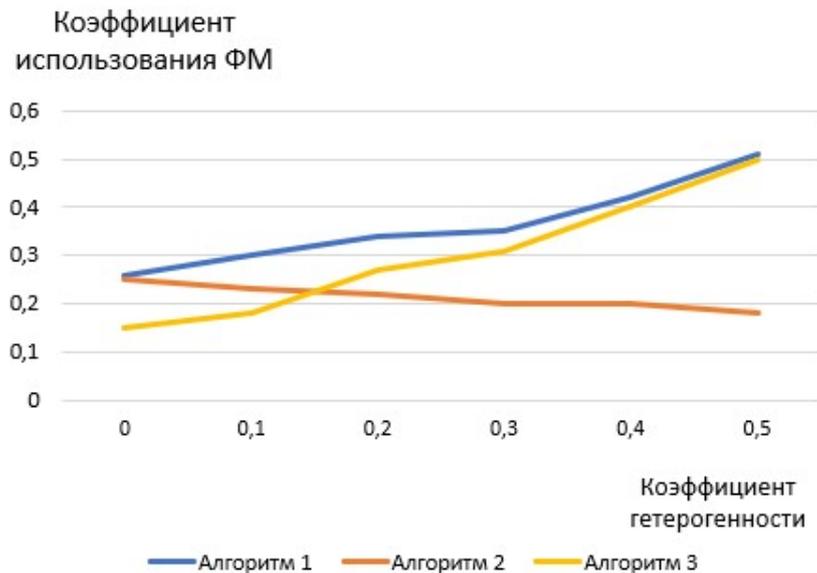


Рис. 5. Усредненные результаты имитационного эксперимента по оцениванию значения коэффициента использования физических машин после реализации исследуемых алгоритмов перераспределения виртуальных машин для виртуализированного ЦОД с коэффициентом гетерогенности

Заключение

Сформированная система поддержки отличается возможностью расширения и высокой адаптивностью к условиям современных виртуализированных ЦОД. Она позволяет централизованно управлять и следить за процессами, одновременно отвечая требованиям кроссплатформенной совместимости и интеграции с имеющимися средствами мониторинга, что превращает ее в ключевой инструмент для обеспечения надежности и продуктивности работы ЦОД.

Эффективное применение фреймворка PySyncObj и умелое распределение функциональных зон на два уровня архитектуры обеспечивает высокую производительность и надежность в управлении виртуальными машинами. Механизм поддержки перераспределения виртуальных машин не только облегчает работу администраторов, но и способствует более эффективному использованию вычислительных ресурсов, что особенно актуально в условиях быстрого развития современной ИТ-инфраструктуры.

Разработанная архитектура программного обеспечения для поддержки процесса перемещения виртуальных машин в гетерогенных ЦОД позволяет динамически перераспределять виртуальные машины, основываясь на дисбалансе виртуализированных вычислительных ресурсов, которые организованы в подгруппы физических машин с гомогенной архитектурой. Имитационное моделирование подтверждает успешное достижение поставленных задач исследования.

Список литературы

1. Жукабаева Т. К., Кусаинова А. Т. Технология Больших данных (Big Data). Основные характеристики и перспективы применения // ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net>
2. Hemn B. A. A brief survey on big data: technologies, terminologies and data-intensive applications // Journal of Big Data. 2022. Vol. 9 (1). P. 36. doi: 10.1186/s40537-022-00659-3
3. Bakhtiyar S., Oleg S. Building the Software Defined Data Center // Proceedings of the Institute for System Programming of RAS. 2018. Vol. 30 (6). P. 7–24. doi: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-1.
4. Yaseein S. H., Maen A., Ahmed S. A., Saleh A. Data Centre Infrastructure: Design and Performance // Latest Advances and New Visions of Ontology in Information Science. 2023. doi: 10.5772/intechopen.109998
5. Бумажкина Н. Ю. К вопросу о виртуализации вычислительных и телекоммуникационных ресурсов центра обработки данных // Научная сессия ТУСУР – 2024: XXIX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2024. С. 107–110.
6. Shabanov B. M., Samovarov O. I. Building the Software Defined Data Center // Proceedings of the Institute for System Programming of RAS. 2018. doi: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-1
7. Bumazhkina N. Yu., Zaharova I. N., Kochkurov A. E. On the use of live migration technologies for virtual machines in the task of optimizing data center resources // Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP-2024'SCT) Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference. Yelm, WA, USA, 2024. Vol. 2. P. 133–137.
8. Mollamotalebi M. Shahnaz H. Multi-objective dynamic management of virtual machines in cloud environments // Journal of Cloud Computing. 2017. Vol. 6 (1). doi: 10.1186/s13677-017-0086-z

9. Choudhary A., Govil M., Singh G., Awasthi L., Pilli E., Kapil D. A critical survey of live virtual machine migration techniques // *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*. 2017. Vol. 6 (23). P. 2–41. doi: 10.1186/s13677-017-0092-1
10. Shakya A., Garg D., Nayak P. Hybrid Live VM Migration: An Efficient Live VM Migration Approach in Cloud Computing // *Advanced Informatics for Computing Research*. 2018. P. 600–611. doi: 10.1007/978-981-13-3140-4_54
11. Mishra M., Sahoo A. On theory of VM placement: Anomalies in existing methodologies and their mitigation using a novel vector based approach // *IEEE International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. 2011. P. 275–282. doi: 10.1109/CLOUD.2011.38
12. Карпова О. В., Филонова Ю. Б., Кузина В. В. Критерии оценки качества и рисков технологического процесса разработки программного продукта // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2024. № 1. С. 56–69.
13. Bae S. JavaScript Data Structures and Algorithms: An Introduction to Understanding and Implementing Core Data Structure and Algorithm // *Library of Congress Control Number: 2019930417*. 2019. doi: 10.1007/978-1-4842-3988-9
14. Федорова Л. М. Системы мониторинга. Обзор и сравнение // *Вестник науки и образования*. 2020. Т. 4, № 10 (88). С. 16–18.
15. Ramasubramani V., Adorf C. S., Dice B. D. signac: A Python framework for data and workflow management // *17th Python in Science Conference At: Austin, TX*. 2018. doi: 10.25080/Majora-4af1f417-016
16. Майер Р. В. Компьютерное моделирование : учеб.-метод. пособие для студентов педагогических вузов [Электронное учебное издание на компакт-диске]. Глазов : Глазов. гос. пед. ин-т, 2015. 24,3 Мб.
17. Аверина Т. А. Построение алгоритмов статистического моделирования систем со случайной структурой : учеб. пособие. Новосибирск : РИЦ НГУ, 2015. 155 с.
18. Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Майоров Г. С. Разработка мультиагентной модели интегрированной энергоснабжающей системы в программной среде AnyLogic // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24 (5). С. 1080–1092.
19. Егоров С. Выбор языка имитационного моделирования, или не заколачивайте гвозди микроскопом. URL: <https://www.anylogic.ru/blog/vybor-yazyka-imitatsionnogo-modelirovaniya-ili-ne-zakolachivayte-gvozd-i-mikroskopom/> (дата обращения: 09.01.2024).

References

1. Zhukabaeva T.K., Kusainova A.T. Big Data Technology (Big Data). Main characteristics and application prospects. *ResearchGate*. (In Russ.). Available at: <https://www.researchgate.net>
2. Hemn B.A. A brief survey on big data: technologies, terminologies and data-intensive applications. *Journal of Big Data*. 2022;9(1):36. doi: 10.1186/s40537-022-00659-3
3. Bakhtiyar S., Oleg S. Building the Software Defined Data Center. *Proceedings of the Institute for System Programming of RAS*. 2018;30(6):7–24. doi: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-1
4. Yaseein S.H., Maen A., Ahmed S.A., Saleh A. Data Centre Infrastructure: Design and Performance. *Latest Advances and New Visions of Ontology in Information Science*. 2023. doi: 10.5772/intechopen.109998
5. Bumazhkina N.Yu. On the issue of virtualization of computing and telecommunication resources of the data processing center. *Nauchnaya sessiya TUSUR – 2024: XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Scientific session TUSUR – 2024: the 29th International scientific*

- and engineering conference of students, postgraduate students and young scientists. Tomsk, 2024:107–110. (In Russ.)
6. Shabanov B.M., Samovarov O.I. Building the Software Defined Data Center. *Proceedings of the Institute for System Programming of RAS*. 2018. doi: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-1
 7. Bumazhkina N.Yu., Zaharova I.N., Kochkurov A.E. On the use of live migration technologies for virtual machines in the task of optimizing data center resources. *Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP-2024'SCT) Proceedings of the XXIX-th International Open Science Conference*. Yelm, WA, USA, 2024;2:133–137.
 8. Mollamotalebi M. Shahnaz H. Multi-objective dynamic management of virtual machines in cloud environments. *Journal of Cloud Computing*. 2017;6(1). doi: 10.1186/s13677-017-0086-z
 9. Choudhary A., Govil M., Singh G., Awasthi L., Pilli E., Kapil D. A critical survey of live virtual machine migration techniques. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*. 2017;6(23):2–41. doi: 10.1186/s13677-017-0092-1
 10. Shakya A., Garg D., Nayak P. Hybrid Live VM Migration: An Efficient Live VM Migration Approach in Cloud Computing. *Advanced Informatics for Computing Research*. 2018:600–611. doi: 10.1007/978-981-13-3140-4_54
 11. Mishra M., Sahoo A. On theory of VM placement: Anomalies in existing methodologies and their mitigation using a novel vector based approach. *IEEE International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. 2011:275–282. doi: 10.1109/CLOUD.2011.38
 12. Karpova O.V., Filonova Yu.B., Kuzina V.V. Criteria for assessing the quality and risks of the technological process of software product development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(1):56–69. (In Russ.)
 13. Bae S. JavaScript Data Structures and Algorithms: An Introduction to Understanding and Implementing Core Data Structure and Algorithm. *Library of Congress Control Number: 2019930417*. 2019. doi: 10.1007/978-1-4842-3988-9
 14. Fedorova L.M. Monitoring systems. Review and comparison. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of science and education*. 2020;4(10):16–18. (In Russ.)
 15. Ramasubramani V., Adorf C.S., Dice B.D. signac: A Python framework for data and workflow management. *17th Python in Science Conference At: Austin, TX*. 2018. doi: 10.25080/Majora-4af1f417-016
 16. Mayer R.V. *Komp'yuternoe modelirovanie: ucheb.-metod. posobie dlya studentov pedagogicheskikh vuzov = Computer modeling: teaching guide for students of pedagogical universities*. Glazov: Glazov. gos. ped. in-t, 2015;24,3 Mb. (In Russ.)
 17. Averina T.A. *Postroenie algoritmov statisticheskogo modelirovaniya sistem so sluchaynoy strukturoy: ucheb. posobie = Construction of algorithms for statistical modeling of systems with random structure: teaching guide*. Novosibirsk: RITs NGU, 2015:155. (In Russ.)
 18. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Mayorov G.S. Development of a multi-agent model of an integrated energy supply system in the AnoLogic software environment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1080–1092. (In Russ.)
 19. Egorov S. *Vybor yazyka imitatsionnogo modelirovaniya, ili ne zakolachivayte gvozdi mikroskopom = Choosing a simulation language, or don't hammer nails with a microscope*. (In Russ.). Available at: <https://www.anylogic.ru/blog/vybor-yazyka-imitatsionnogo-modelirovaniya-ili-ne-zakolachivayte-gvozdi-mikroskopom/> (accessed 09.01.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Наталья Юрьевна Бумажкина

адъюнкт, Академия Федеральной службы
охраны Российской Федерации (Россия,
г. Орёл, ул. Приборостроительная, 35)

E-mail: orui@mvd.ru

Natalya Yu. Bumazhkina

Adjunct, Academy of the Federal Security
Service of the Russian Federation
(35 Priborostroitelnaya street, Orel, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 15.01.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.01.2025

Принята к публикации / Accepted 14.02.2025

УДК 519.24; 53; 57.017
doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-3

Корректное тестирование качества работы сверточных сетей искусственных нейронов, учитывающее реальные условия их эксплуатации

В. И. Волчихин¹, А. И. Иванов², П. Е. Селиванов³, Е. А. Малыгина⁴

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

³Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹cnit@pnzgu.ru, ²ivan@pniei.penza.ru, ³p.e.selivanov@mtuci.ru, ⁴malygina@mirea.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время активно используются многослойные сверточные сети искусственных нейронов глубокого обучения для распознавания лиц людей. Их тестирование выполняется по стандарту ISO/IEC 19795-1–2007 испытательными лабораториями недружественных стран, со стороны которых возможно искажение результатов тестирования. *Материалы и методы.* Базовый международный стандарт оговаривает объем тестовой базы реальных лиц людей. Возможно существенное сокращение размеров тестовой базы через морфинг-синтез новых биометрических образов скрещиванием образов родителей по отечественному стандарту ГОСТ Р 2633.2–2010. При этом некорректное скрещивание образов родителей может привести к искажению результатов тестирования. Положение усложняется тем, что средство нейросетевого распознавания лиц будет работать с реальными данными лиц людей разного качества. *Результаты.* Предложено устранить угрозу возможного искажения результатов тестирования за счет предоставления испытательной лаборатории заказчиком ряда статистических моментов, описывающих реальные рабочие базы лиц людей. Показано, что кроме математического ожидания и стандартного отклонения, необходимо использовать третий и четвертый статистические моменты. При вычислении статистических моментов предложено обучать тестируемую нейросеть распознаванию конкретных биометрических образов лиц людей, давших свое согласие на использование их персональных данных.

Ключевые слова: реальные биометрические образы, синтетические биометрические образы, морфинг-скрещивание биометрических образов, тестирование нейросетей глубокого обучения

Для цитирования: Волчихин В. И., Иванов А. И., Селиванов П. Е., Малыгина Е. А. Корректное тестирование качества работы сверточных сетей искусственных нейронов, учитывающее реальные условия их эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 29–39. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-3

Correct testing of the quality of convolutional networks of artificial neurons, taking into account the real conditions of their operation

V.I. Volchikhin¹, A.I. Ivanov², P.E. Selivanov³, E.A. Malygina⁴

¹Penza State University, Penza, Russia

²Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

© Волчихин В. И., Иванов А. И., Селиванов П. Е., Малыгина Е. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

³Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

⁴MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹cnit@pnzgu.ru, ²ivan@pnici.penza.ru, ³p.e.selivanov@mtuci.ru, ⁴malygina@mirea.ru

Abstract. *Background.* Currently, multilayer convolutional networks of artificial deep learning neurons are actively used to recognize people's faces. Their testing is carried out according to the ISO/IEC 19795-1-2007 standard by testing laboratories in unfriendly countries, which may distort the test results. *Materials and methods.* The basic international standard stipulates the volume of the test base of real people's faces. It is possible to significantly reduce the size of the test base through morphing synthesis of new biometric images by crossing the images of parents according to the domestic standard GOST R 2633.2-2010. At the same time, incorrect crossing of parent images can lead to a distortion of the test results. The situation is complicated by the fact that the neural network face recognition tool will work with real data of people's faces of different quality. *Results.* It is proposed to eliminate the threat of possible distortion of test results by providing the testing laboratory by the customer with a number of statistical points describing the real working databases of people's faces. It is shown that in addition to mathematical expectation and standard deviation, it is necessary to use the third and fourth statistical moments. When calculating statistical points, it is proposed to train the tested neural network to recognize specific biometric images of the faces of people who have given their consent to the use of their personal data.

Keywords: real biometric images, synthetic biometric images, morphing crossing of biometric images, testing of deep learning neural networks

For citation: Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Selivanov P.E., Malygina E.A. Correct testing of the quality of convolutional networks of artificial neurons, taking into account the real conditions of their operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Поволжский регион. Технические науки = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):29–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-3

Общие положения тестирования приложений биометрико-нейросетевого распознавания лиц людей

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина № 490 от 10.10.2019 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» к 2030 г. Россия должна занимать одно из ведущих мест в мире как производитель и потребитель промышленных приложений искусственного интеллекта. В связи с этим в 2019 г. был создан в рамках Госстандарта национальный технический комитет № 164 «Искусственный интеллект» (ТК 164), являющийся аналогом международного комитета ISO/IEC JTC1 sc42.

За прошедшее время ТК 164 гармонизовал, разработал и ввел в действие на территории РФ порядка 200 национальных стандартов, регламентирующих те или иные аспекты приложений искусственного интеллекта (ИИ).

Следует отметить, что приложения искусственного интеллекта разнообразны и к ним могут предъявляться разные требования. Одними из самых жестких требований являются требования Федерального закона РФ № 152-ФЗ от 27.07.2006 «О персональных данных». В России и других странах приложения ИИ, ориентированные на работу с персональными данными пользователей (персональными биометрическими данными), попадают в особую категорию. При этом именно технологии биометрической идентификации и аутентификации являются наиболее развитыми и наиболее глубоко исследованными [1].

В настоящее время одной из самых распространенных является технология идентификации людей по их лицам, опирающаяся на использование нейронных сетей «глубокого обучения» [2, 3]. Эта технология иллюстрируется рис. 1, где использована пятислойная нейросеть, заранее обученная обогащать биометрические данные лица человека.

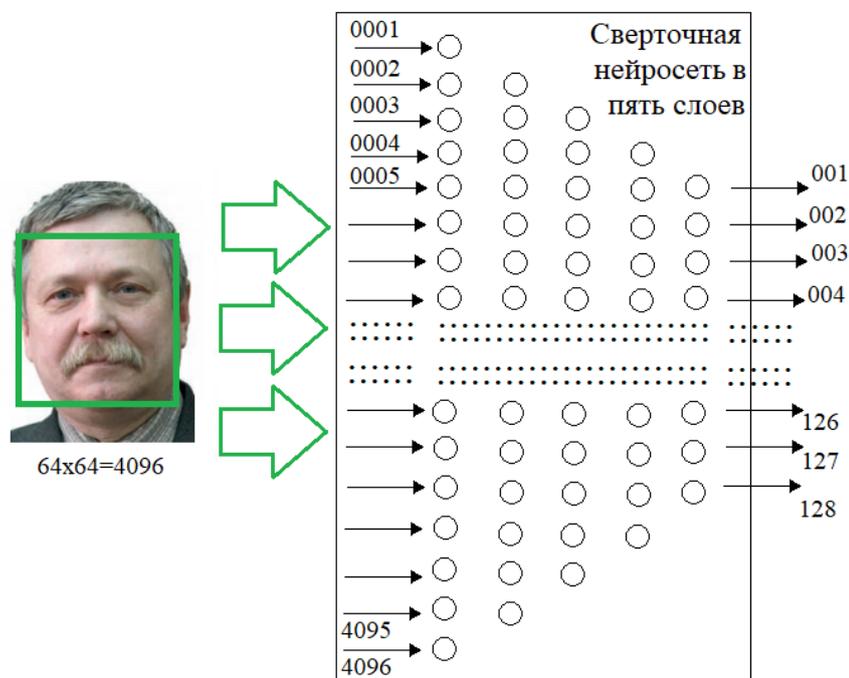


Рис. 1. Преобразование данных пятислойной нейросетью «глубокого обучения», свертывающей вектор из 4096 пикселей в вектор из 128 непрерывных биометрических параметров

Из данных рис. 1 видно, что средство биометрической идентификации обнаруживает в видеоданных лицо человека, выделяя его квадратом. Далее средство выполняет приведение лица к единому масштабу, преобразуя его размеры к квадрату $64 \times 64 = 4096$ пикселей. В итоге получаем вектор из 4096 8-битных значений яркости пикселей, которые можно рассматривать как входной вектор континуумов.

Пятислойная нейросеть заранее обучена обогащать биометрические данные яркости пикселей в более короткий вектор из 128 биометрических параметров лица человека.

Сверточные нейросети могут иметь разную архитектуру, в том числе оригинальную. Они способны иметь разные окна выделения лица человека (64×64 ; 128×128 ; 256×256), соответственно с этим будет варьироваться размерность входного вектора «сырых» биометрических данных. Возможны вариации, связанные с числом свертывающих данных искусственных нейронов в каждом слое и по числу слоев нейронов в той или иной сверточной нейросети.

Как результат, программно-аппаратные продукты разных производителей могут существенно отличаться по качеству принимаемых ими решений.

В связи с этим обстоятельством необходим независимый контроль качества биометрико-нейросетевых приложений ИИ, участвующих в реализации юридически значимых функций (контроль доступа на территорию предприятия, документирование рабочего времени и т.д.).

Функцию контроля качества работы того или иного приложения биометрической идентификации по требованиям международного технического комитета стандартизации должны выполнять испытательные лаборатории, например, опираясь на действующий в России стандарт¹.

К сожалению, на данный момент не существует отечественных испытательных лабораторий, предлагающих услуги по независимому тестированию аппаратно-программных приложений для распознавания лиц людей.

Одной из причин сложившейся ситуации является действие ФЗ № 152 «О персональных данных», запрещающего сбор, хранение, использование персональных биометрических данных без согласия их носителей (владельцев). Аналогичные юридические ограничения действуют и в других странах, однако за рубежом ряд университетов Канады Великобритании и NIST (National Institute of Standards and Technology – США) сформировали достаточно большие тестовые базы и создали испытательные лаборатории. К сожалению, все действующие испытательные лаборатории находятся в недружественных странах и к ним не может быть доверия со стороны отечественных потребителей и производителей.

Морфинг-размножение малого числа биометрических образов лиц реальных людей

Положение с зарубежными испытательными лабораториями осложняется тем, что по законам их стран они не предоставляют информацию об используемых ими тестовых базах. Обычно озвучивается только информация о размере тестовой базы (о числе примеров биометрических образов в тестовой базе).

Следует отметить, что в России вопрос о размере тестовой базы биометрических образов решается, если опираться на стандарты ГОСТ Р 52633.1² и ГОСТ Р 52633.2³. Оба стандарта действуют в связке и позволяют решить проблему дополнения ограниченных баз естественных биометрических образов большим числом синтетических биометрических образов. Технология размножения естественных биометрических образов поясняется рис. 2.

Сбор естественных биометрических образов (изображений лица человека) по требованиям стандарта ГОСТ Р 52633.1 рекомендуется в объеме 20 примеров и выше. Предположим, что сформирована исходная база из 8 образов. База столь малого объема может быть увеличена за счет

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1–2007 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура».

² ГОСТ Р 52633.1–2009 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации».

³ ГОСТ Р 52633.2–2010 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации».

морфинг-скрещивания векторов длиной 128 биометрических параметров примеров.

На рис. 2 показана процедура морфинг-скрещивания примеров образа-Q1 и примеров образа-Q7, рождающая синтетический образ-Q9. Вектор биометрических параметров синтезированного образа вычисляется усреднением данных образов-родителей:

$$V_{Q9,i} = \frac{v_{Q1,i} + v_{Q7,i}}{2} \text{ при } i = 001, \dots, 128, \quad (1)$$

где $v_{Q1,i}$ – i -й биометрический параметр первого образа-родителя; $v_{Q7,i}$ – i -й биометрический параметр седьмого образа-родителя; $V_{Q9,i}$ – i -й биометрический параметр синтетического (девятого) образа-потомка.

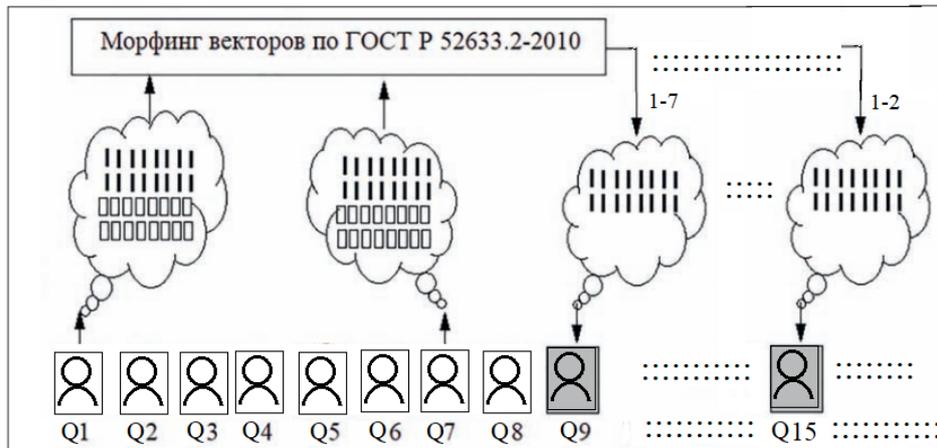


Рис. 2. Размножение малого числа естественных биометрических образов-родителей морфинг-скрещиванием

То есть малая база из 8 естественных биометрических образов-родителей может быть дополнена 28 синтетическими образами-потомками. Получаем рост объема тестовой базы в 4,5 раза. Если исходная база состоит из 16 образов, то получение одного образа-потомка от двух образов-родителей позволяет добавить в тестовую базу 490 образов или увеличить объем базы в 8,5 раза. Наблюдается экспоненциальный рост объема синтезированной тестовой базы, что и позволяет ослабить проблему формирования больших тестовых баз биометрических образов.

Хи-квадрат нормализация отклика Евклидова решающего правила для длинных векторов биометрических параметров

Для каждого лица человека в соответствии с требованиями пакета стандартов ISO/IEC JTC1 sc37 создается свой биометрический шаблон. Если используется Евклидово решающее правило, то в этом случае биометрический шаблон создается в форме вектора математических ожиданий $E(v_i) = \{E_1, E_2, \dots, E_{128}\}$ и вектора стандартных отклонений биометрических параметров $\sigma(v_i) = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{128}\}$. Нормирование и центрирование биометрических параметров по данным шаблона дает хи-квадрат распределение от-

кликов решающего правила на примеры образов лиц «Чужие» из тестовой базы:

$$\chi^2 = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} \left\{ \frac{(x_i - E_i)}{\sigma_i} \right\}^2, \quad (2)$$

где x_i – i -й биометрический параметр примера образа «Чужой» из тестовой базы.

Из классической статистики известно [4], что с ростом числа степеней свободы монотонно растет первый статистический момент (математическое ожидание $E(\chi^2)$) и второй статистический момент (стандартное отклонение $\sigma(\chi^2)$). На рис. 3 отражены нормированные плотности хи-квадрат распределения (2) для 16, 32, 64, 128 степеней свободы.

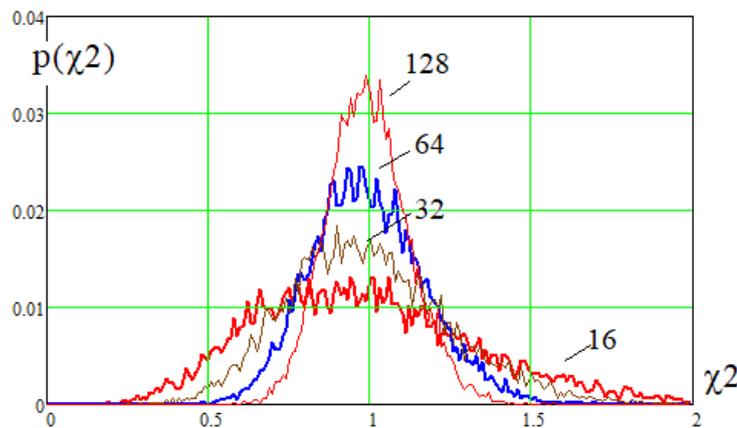


Рис. 3. Плотности хи-квадрат распределений при разных значениях числа степеней свободы

На рис. 3 приведены идеальные значения распределений независимых данных выборки «Свой». Изначально при малом числе степеней свободы хи-квадрат распределения асимметричны. Однако по мере роста числа степеней свободы симметрия хи-квадрат распределений растет. Из данных рис. 3 видно, что хи-квадрат распределение для 128 степеней свободы образа «Свой» ближе всех к нормальному закону распределения.

Для классического ненормированного хи-квадрат распределения независимых данных (2) «Свой» аналитически найдены статистические моменты [4]. В частности, математическое ожидание хи-квадрат распределения данных «Свой» совпадает с числом степеней свободы:

$$E\{\chi^2(f)\} = f, \quad (3)$$

где f – число степеней свободы, составляющее для образа «Свой» 128, а для образов тестовой базы «Чужие» много больше 128.

Стандартное отклонение также является простой функцией числа степеней свободы:

$$\sigma\{\chi^2(f)\} = \sqrt{2f}. \quad (4)$$

Третий статистический момент, или коэффициент симметрии, описывается следующей формулой:

$$\mu_3\{\chi^2(f)\} = 2\sqrt{\frac{2}{f}}. \quad (5)$$

Четвертый статистический момент, или коэффициент эксцесса, связан с числом степеней свободы следующим соотношением:

$$\mu_4\{\chi^2(f)\} = 3 + \frac{12}{f}. \quad (6)$$

Еще одной важной устойчивой статистикой характеристикой является мода плотности распределения, положение которой совпадает с максимумом плотности распределения:

$$M\{\chi^2(f)\} = f - 2. \quad (7)$$

Приведенные выше статистические моменты являются одномерными функциями χ^2 переменной. Они вполне пригодны для статистического описания тестовой базы «Чужие», однако подобные статистические моменты обладают низкой чувствительностью по отношению к изменениям размеров базы и ее содержания. Можно показать, что увеличение (уменьшение) числа примеров базы «Чужие» в 2 раза приводит к изменению значений классических статистических моментов (3)–(7) порядка 20 %.

Перспектива использования частных образно-ориентированных статистических моментов

Если отказаться от классического исследования одномерных статистических моментов как одномерных функций и рассматривать задачу как многомерную, то можно получить дополнительные возможности. При этом можно обойти проблему усложнения многомерных вычислений, например, воспользовавшись вычислением образно-ориентированных статистических моментов.

В частности, можно воспользоваться некоторым заранее заданным образом $Q1$, обучить на его распознавание тестируемую нейросеть. Если теперь подать на тестируемую нейросеть данные тестовой базы «Чужие» и вычислить χ^2 отклики по решающему правилу (2), то они дадут плотность распределения ошибок второго рода $p_2(\chi^2/Q1)$. Обладая этой функцией, можно оценить математическое ожидание этой функции:

$$E_N(\chi^2 / Q1) = \int_0^N \chi^2 \cdot p_2(\chi^2 / Q1) \cdot d\chi^2, \quad (8)$$

где N – число примеров образов лиц «Чужие» в тестовой базе.

Очевидно, что по аналогичной формуле можно оценить второй статистический момент, или стандартное отклонение:

$$\sigma_N(\chi^2 / Q1) = \int_0^N (\chi^2 - E_N(\chi^2 / Q1)) \cdot p_2(\chi^2 / Q1) \cdot d\chi^2. \quad (9)$$

Нетрудно показать, что преобразования вида (8) и (9) могут быть построены для любого статистического момента эмпирического хи-квадрат распределения $p_2(\chi^2/Q1)$.

Принципиально важным является то, что плотности распределения вероятностей ошибок второго рода, ориентированные на разные биометрические образы, не совпадают между собой:

$$p_2(\chi^2/Q1) \neq p_2(\chi^2/Q2) \neq p_2(\chi^2/Q3) \neq \dots \quad (10)$$

Как результат, не совпадают между собой и все их статистические моменты:

$$\begin{cases} E(\chi^2 / Q1) \neq E(\chi^2 / Q2) \neq \dots \neq E(\chi^2 / Q8) \\ \sigma(\chi^2 / Q1) \neq \sigma(\chi^2 / Q2) \neq \dots \neq \sigma(\chi^2 / Q8) \\ \mu_3(\chi^2 / Q1) \neq \mu_3(\chi^2 / Q2) \neq \dots \neq \mu_3(\chi^2 / Q8) \\ \mu_4(\chi^2 / Q1) \neq \mu_4(\chi^2 / Q2) \neq \dots \neq \mu_4(\chi^2 / Q8) \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (11)$$

Оценим то, насколько расходятся статистические моменты при смене ориентации нейросетевых вычислений на тот или иной биометрический образ. Проще всего оценить изменение ориентированных статистик, используя вырожденную тестовую базу, состоящую из одного биометрического образа. В этом случае Евклидово решающее правило (2) является хорошим нормализатором, как это отображено на рис. 3. То есть плотности распределения ошибок второго рода $p_2(Q7/Q1)$ и $p_2(Q1/Q7)$ будут описываться нормальными распределениями.

Результаты соответствующих численных экспериментов с двумя биометрическими образами лиц людей отражены на рис. 4.

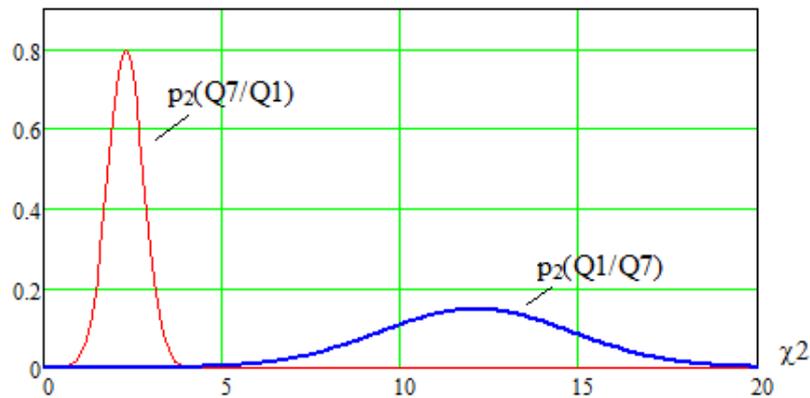


Рис. 4. Два ориентированных друг на друга распределения биометрических образов

Из данных рис. 4 видно, что математическое ожидание вероятности ошибок $p_2(Q7/Q1)$ мало и составляет $E(p_2(Q7/Q1)) \approx 2,31$ по шкале хи-квадрат состояний. Для обратно ориентированных данных $E(p_2(Q1/Q7)) \approx 12,1$ по шкале хи-квадрат состояний. Можно наблюдать примерно 6-кратное изменение первого статистического момента при смене ориентации данных с образа $Q1$ на образ $Q7$.

Аналогичная ситуация наблюдается и для второго статистического момента. При ориентации нейросети на образ $Q1$ стандартное отклонение составляет $\sigma(p_2(Q7/Q1)) \approx 0,51$. Переобучение нейросети на образ $Q7$ приводит к существенному росту стандартного отклонения $\sigma(p_2(Q1/Q7)) \approx 2,72$. Второй статистический момент увеличивается примерно в 5 раз.

Таким образом переход к образно-ориентированным статистическим моментам хи-квадрат распределения откликов сверточных нейросетей позволяет наблюдать существенные изменения многомерных хи-квадрат статистик.

Злоупотребления со стороны недружественных испытательных лабораторий

Очевидно, что морфинг-размножение векторов биометрических параметров [5] является достаточно универсальным инструментом. Таким же инструментом «недружественный тестор» может не только увеличить тестовую выборку, но и при желании ее исказить в сторону завышения или занижения результатов тестирования.

При этом выявить искажения невозможно из-за того, что законодательство всех западных стран запрещает публикацию изображений лиц людей, на которых выполняется тестирование.

Если испытательная лаборатория захочет занизить вероятностные характеристики тестируемого продукта, то ей достаточно при морфинг-размножении данных увеличить объем скрещивания пар «плохих» образоводителей, добываясь выбранного заранее объема тестовой базы – N .

Если испытательная лаборатория недружественной страны пожелает завысить вероятностные показатели тестируемого нейросетевого приложения, то из тестовой выборки может изъять «плохие» образы, заменив их «хорошими» и «отличными» образами.

В первом случае есть возможность доказать злоупотребления полномочиями только контролируя третий статистический момент и четвертый статистический момент тестовой базы, однако этого сделать нельзя, так как стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1–2007 не требует опубликования четырех статистических моментов тестовых баз лиц людей.

Необходимость разработки национального стандарта России по тестированию сверточных нейросетей «глубокого обучения»

В силу того, что в условиях проведения специальной военной операции предприятия РФ не могут тестировать свои нейросетевые решения в испытательных лабораториях недружественных стран, России необходимо создавать собственные испытательные лаборатории.

При этом необходимо создать национальный стандарт по тестированию качества работы сверточных нейронных сетей, распознающих лица людей. При этом отечественные испытательные лаборатории должны иметь возмож-

ность получать достоверные статистики, опираясь на уже действующие в стране национальные стандарты ГОСТ Р 52633.1–2009 и ГОСТ Р 52633.2–2010 по сбору биометрических данных лиц людей и формированию тестовых баз требуемого размера.

Дополнительным условием должны стать требования ФЗ № 152 «О персональных данных», прямо запрещающего раскрытие персональных данных о лицах людей, работающих на том или ином предприятии.

Новый стандарт по тестированию, с одной стороны, должен обеспечить конфиденциальность «рабочих баз» с которыми будет работать тестируемая нейросеть. С другой стороны, отечественная испытательная лаборатория должна синтезировать собственную тестовую базу, совпадающую по нескольким статистическим моментам с конфиденциальной рабочей базой лиц сотрудников того или иного предприятия.

Список литературы

1. Язов Ю. К., Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Назаров И. Г. Нейросетевая защита персональных биометрических данных. М. : Радиотехника, 2012. 157 с.
2. Николенко С., Кудрин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб. : Изд.-дом «Питер», 2018.
3. Аггарвал Чару. Нейронные сети и глубокое обучение. СПб. : Диалектика, 2020. 756 с.
4. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
5. Иванов А. И., Лекарь Л. А. О необходимости отечественного стандарта на тестирование качества нейросетевого распознавания лиц людей // Системы безопасности. 2023. № 5. С. 18–23.

References

1. Yazov Yu.K., Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Nazarov I.G. *Neurosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh = Neural network protection of personal biometric data*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:157. (In Russ.)
2. Nikolenko S., Kudrin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey = Deep learning: a dive into the world of neural networks*. Saint Petersburg: Izd.-dom «Piter», 2018. (In Russ.)
3. Aggarwal Charu. *Neyronnye seti i glubokoe obuchenie = Neural Networks and Deep Learning*. Saint Petersburg: Dialektika, 2020:756. (In Russ.)
4. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: FIZMATLIT, 2006:816. (In Russ.)
5. Ivanov A.I., Lekar' L.A. On the need for a domestic standard for testing the quality of neural network facial recognition. *Sistemy bezopasnosti = Security systems*. 2023;(5):18–23. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Иванович Волчихин
доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cnit@pnzgu.ru

Vladimir I. Volchikhin
Doctor of engineering sciences, professor,
president of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, профессор,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pnici.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of engineering sciences, professor,
scientific adviser, Penza Scientific
Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Петр Евгеньевич Селиванов

проректор по перспективным
проектам и инновациям, Московский
технический университет связи
и информатики (Россия, г. Москва,
ул. Авиамоторная, 8а)

E-mail: p.e.selivanov@mtuci.ru

Petr E. Selivanov

Vice-rector for advanced projects
and innovations, Moscow Technical
University of Communications
and Informatics (8a Aviamotornaya street,
Moscow, Russia)

Елена Александровна Малыгина

доктор технических наук, доцент
кафедры информационных технологий
в государственном управлении,
МИРЭА – Российский технологический
университет (Россия, г. Москва,
пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: malygina@mirea.ru

Elena A. Malygina

Doctor of engineering sciences, associate
professor of the sub-department
of information technologies in public
administration, 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 24.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 23.01.2025

Принята к публикации / Accepted 10.02.2025

УДК 004.81

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-4

Метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической многоагентной системы

Ю. В. Дубенко¹, Е. Е. Дышкант², В. А. Демидов³

^{1,3}Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

²Армавирский механико-технологический институт (филиал)
Кубанского государственного технологического университета,
Армавир, Краснодарский край, Россия

¹scorpioncool1@yandex.ru, ²ed0802@yandex.ru, ³demidov_vladislav96@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Архитектура многоагентной системы (МАС) – это множество связей между агентами, их ролей, а также правил, регламентирующих их поведение. От выбора архитектуры во многом зависит эффективность МАС. В процессе функционирования возможны ситуации, требующие оперативной модификации архитектуры МАС (изменение параметров окружающей среды, неисправность и выход из строя агентов). Вариативность условий функционирования агентов (различные варианты окружающей среды, типы задач) требует большей гибкости при настройке архитектуры МАС, что не могут обеспечить существующие решения. Объектом исследования являются многоагентные системы. Предмет исследования – методы формирования архитектуры МАС. Цель – разработка метода синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической МАС. *Материалы и методы.* Использованы методы парадигмы обучения с подкреплением, генетический алгоритм. *Результаты.* Разработан метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической МАС, характеризующийся автоматической модификацией множества связей агентов в процессе функционирования МАС (а также базовых правил, определяющих условия возникновения связей), возможностью определения оптимальных параметров МАС для конкретной окружающей среды с помощью генетического алгоритма, а также способностью к моделированию нескольких типов архитектур МАС. *Выводы.* Разработанный метод может найти свое практическое применение при реализации следующих задач: обследование (или патрулирование) мобильными роботами инфраструктурных объектов; реализация искусственного интеллекта в компьютерных играх.

Ключевые слова: многоагентная система, архитектура, адаптация, агент, иерархия, связь, генетический алгоритм

Для цитирования: Дубенко Ю. В., Дышкант Е. Е., Демидов В. А. Метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической многоагентной системы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 40–54. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-4

Method of synthesis and automatic adaptation of the architecture of a hierarchical multi-agent system

Yu.V. Dubenko¹, E.E. Dyshkant², V.A. Demidov³

^{1,3}Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

²Armavir Mechanical and Technological Institute (branch)
of the Kuban State Technological University, Armavir, Krasnodar region, Russia
¹scorpioncool1@yandex.ru, ²ed0802@yandex.ru, ³demidov_vladislav96@mail.ru

Abstract. *Background.* The architecture of a multi-agent system (MAS) is a set of connections between agents, their roles, and rules governing their behavior. The effectiveness of a MAS largely depends on the choice of architecture. During operation, situations may arise that require prompt modification of the MAS architecture (changes in environmental parameters, malfunctions, and failures of agents). The variability of agent operating conditions (various environmental options, types of tasks) requires greater flexibility in configuring the MAS architecture, which existing solutions cannot provide. The object of the study is multi-agent systems. The subject of the study is methods for forming the MAS architecture. The aim of the work is to develop a method for synthesizing and automatically adapting the architecture of a hierarchical MAS. *Materials and methods.* Reinforcement learning paradigm methods, genetic algorithm. *Results.* As a result, a method for synthesizing and automatically adapting the architecture of a hierarchical MAS was developed, characterized by automatic modification of a set of agent connections during the operation of the MAS (as well as basic rules that determine the conditions for the emergence of connections), the ability to determine the optimal parameters of the MAS for a specific environment using a genetic algorithm, as well as the ability to model several types of MAS architectures. *Conclusions.* The developed method can find its practical application in the implementation of the following tasks: inspection (or patrolling) of infrastructure facilities by mobile robots; implementation of artificial intelligence in computer games.

Keywords: multi-agent system, architecture, adaptation, agent, hierarchy, communication, genetic algorithm

For citation: Dubenko Yu.V., Dyshkant E.E., Demidov V.A. Method of synthesis and automatic adaptation of the architecture of a hierarchical multi-agent system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):40–54. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-4

Введение

Архитектура многоагентной системы (МАС) – это множество связей между агентами, их ролей, а также правил, регламентирующих их поведение [1]. В табл. 1 приведены результаты оценки существующих решений [2–8] в области реализации архитектур МАС по следующим критериям:

1. *Модификация базовых правил, определяющих условия возникновения связей.* При этом под связью понимается двусторонний информационный обмен между агентами, повторяющийся на некотором временном интервале. Условия возникновения такого обмена регламентируются набором базовых правил, неизменных в течение всего времени решения поставленной задачи.

2. *Автоматическая модификация множества связей в процессе функционирования МАС.* Агенты имеют возможность в процессе решения поставленной задачи разрывать существующие и устанавливать новые связи. При этом факт разрыва связи может быть обозначен как отсутствие информационного обмена между парой агентов на некотором временном интервале.

3. *Число моделируемых типов архитектур составляет 3 и более.* В статье [1] приводится список архитектур МАС, отличающихся наличием/отсутствием горизонтальных или вертикальных связей между агентами, их долговременностью, числом уровней иерархии, например: «иерархия» [9], «конгрегация», «коалиция», «команда», «федерация» и т.д.

4. *Определение оптимальных параметров МАС для окружающей среды конкретного типа.* Очевидно, что в зависимости от типа окружающей среды архитектура МАС, применение которой позволяет максимизировать значения показателей эффективности, может отличаться.

Таблица 1

Оценка существующих решений в области реализации архитектур МАС

Критерий	Работы, удовлетворяющие критерию
1. Модификация базовых правил, определяющих условия возникновения связей	[5, 8]
2. Автоматическая модификация множества связей в процессе функционирования МАС	[3, 5, 7, 8]
3. Число моделируемых типов архитектур составляет 3 и более.	–
4. Определение оптимальных параметров МАС для окружающей среды конкретного типа	[2, 5]

Таким образом, из табл. 1 следует, что рассмотренные решения [2–8] не позволяют моделировать три и более типа архитектур МАС. При этом решения [2, 5] удовлетворяют критерию 4 с определенными оговорками, а именно:

- Решение [2] предполагает оптимизацию с помощью «генетического алгоритма» [10] непосредственно множества связей между агентами (а не базовых правил), при этом находящегося в статичном состоянии в процессе решения поставленной задачи (т.е. модифицированный вид множества связей может быть применен только на новой итерации обучения), что является существенным недостатком, поскольку состояние окружающей среды (как и структура множества агентов) со временем может изменяться.

- Решение [5] позволяет моделировать только два типа архитектур МАС.

Таким образом, целью данной работы является реализация метода синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической МАС, удовлетворяющего всем перечисленным ранее критериям.

Материалы и методы

Пусть E – стохастическая окружающая среда; A – множество гетерогенных интеллектуальных агентов, составляющих МАС S , функционирующих в пределах среды E , основанных на применении парадигмы «обучения с подкреплением» [11] (при этом агенты не имеют информации о технических характеристиках друг друга); T – задача, назначенная агентам множества для выполнения в пределах окружающей среды E (назначается лицом, принимающим решения); O – архитектура МАС S ,

$$O = \{R, T, K\}, \tag{1}$$

где T – допустимые типы связей, $T = \{T_k\}$, $k = \overline{1, |T|}$; K – правила формирования связей, имеющих типы T_k ,

$$K = \left\{ K_{T_k} \left(\mathbf{c}_{a_i}^\tau, \mathbf{c}_{a_j}^\tau \right) \right\}, \quad (2)$$

где $\left\{ \mathbf{c}_{a_i}^\tau, \mathbf{c}_{a_j}^\tau \right\}$ – множества значений некоторых характеристик внутреннего и внешнего состояния агентов a_i и a_j в момент времени τ , $\tau \in \{ \tau_0, \tau_1 = \tau_0 + \Delta\tau, \dots, \tau_{N-1} = \tau_{N-2} + \Delta\tau, \tau_N \}$, $\{ \tau_0, \tau_N \}$ – время начала и окончания процесса выполнения задачи T соответственно, $N \in \mathbb{N}$; R – связи, установленные между агентами множества A , $r \in R$,

$$r = \left\langle \left\langle a_i, I_{a_i} \right\rangle, \left\langle a_j, I_{a_j} \right\rangle, T_{a_i, a_j} \right\rangle, \quad (3)$$

где $a_i \in A$, $a_j \in A$, $\{ I_{a_i}, I_{a_j} \}$ – уровни иерархии агентов a_i и a_j соответственно; T_{a_i, a_j} – тип связи, установленной между агентами a_i и a_j , $T_{a_i, a_j} \in T$, $r = K_{T_k} \left(\mathbf{c}_{a_i}^\tau, \mathbf{c}_{a_j}^\tau \right)$, $i = \overline{1, |A|}$, $j = \overline{1, |A|}$.

Агент $a_i \in A$ в пределах окружающей среды E может иметь некоторое состояние $S_j \in S_E$, S_E – множество возможных состояний агентов относительно окружающей среды E , $j = \overline{1, |S|}$, $S = f(E)$ (например, окружающая среда может быть разбита на множество проходимых или непроходимых клеток фиксированных размеров). После выполнения некоторого примитивного действия A_k (ехать вперед, назад, вправо, влево) состояние агента a_i меняется на S'_j , где $A_k \in A$, A – множество допустимых примитивных действий, $k = \overline{1, |A|}$. Таким образом, был осуществлен переход $\mu_{S_j \rightarrow S'_j} = \left\langle S_j, A_k, S'_j \right\rangle$, за который агенту было назначено подкрепление

$$r = R \left(\mu_{S_j \rightarrow S'_j}, E, T \right), \quad (4)$$

где $R \in [-1, 1]$, R – функция, выполняющая вычисление подкреплений для агентов в зависимости от характеристик окружающей среды и реализуемой задачи (агенту назначается отрицательное подкрепление за действия, отдаляющие его от достижения целевого состояния задачи T , а также угрожающие его технической исправности, например столкновение с препятствием). При этом выбор примитивного действия A_k в состоянии S_j зависит от соответствующего значения Q_{S_j, A_k} (ценность выбора действия A_k в состоянии S_j), а также от «стратегии» π (вероятность выбора в состоянии S_j примитивного действия $A_k : Q_{S_j, A_k} \rightarrow \max$) [11].

Агенты могут устанавливать друг с другом вертикальные или горизонтальные связи. Под вертикальной понимается связь вида $r_{vert} = \{ \gamma, w \}$, где γ – координирующие сигналы, поступающие от агента верхнего уровня

иерархии (агент-координатор), $\gamma = \{t, r_t\}$, t – подзадача, назначенная для выполнения агенту нижнего уровня, $t \subset T$, r_t – подкрепление, назначенное агенту нижнего уровня по результатам выполнения подзадачи t ; w – информационные сигналы, поступающие от агента нижнего уровня (агент-подчиненный), содержащие сведения о результатах выполнения подзадачи t [9].

Под горизонтальными понимаются связи следующих видов: обмен информацией о намерениях (агенты обмениваются данными о действиях, планируемых к выполнению, с целью недопущения конфликтных ситуаций), обмен опытом. При этом под опытом понимается множество кортежей следующего вида:

$$s = \langle S_j, A_k, S'_j, r \rangle. \quad (5)$$

Для оценки эффективности действий агентов применяются следующие показатели:

1) r_p – усредненное вознаграждение по всем траекториям p_{a_i} (под траекторией понимается множество кортежей вида (5), сформированных агентом a_i к текущему моменту времени) (локальный показатель эффективности) [11]:

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^{|A|} \left(\sum_{k=1}^{|p_{a_i}|} \gamma_{r_p}(k) r_k \right)}{|A|}, \quad (6)$$

где $r_k \in s_k$, s_k – кортеж опыта (5), $s_k \in p_{a_i}$; γ_{r_p} – «коэффициент обесценивания» (позволяет снижать веса подкреплений, содержащихся в кортежах опыта, полученного достаточно давно), определяемый по формуле

$$\gamma_{r_p}(k) = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-\beta_{r_p} k}} & \text{при } k > \tau_0, \\ 0, & \text{при } k = \tau_0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\beta_{r_p} \geq 0$ – «скорость обесценивания»;

2) τ_N – время, за которое МАС S была выполнена поставленная задача T (глобальный показатель эффективности).

Таким образом, необходимо разработать метод M , предназначенный для синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической МАС, удовлетворяющей критериям, перечисленным в табл. 1:

$$M : \{A, E, O, T, \alpha\} \rightarrow \{\tau_N | \tau_N > 0\}, \quad (8)$$

при ограничениях $K = f(A, E, T) \wedge \tau_N \rightarrow \max \wedge |\theta| \geq 3 \wedge R \neq \text{const} \forall \tau \in [\tau_0, \tau_N]$, где $f(A, E, T)$ – некоторая функция, формирующая множество базовых правил K на основании множества агентов A , параметров окружающей среды E , поставленной задачи T ; при этом архитектура МАС, сформированная на основании K , позволяет максимизировать показатель τ_N ; θ – множество

воспроизводимых типов архитектур MAC [1]; α – множество показателей эффективности, $\alpha = \{r_p, \tau_N\}$, $\Delta\tau_N = \tau_{Nafter} - \tau_{Nbefore}$; τ_{Nafter} – значение показателя τ_N после применения метода M ; $\tau_{Nbefore}$ – значение показателя τ_N до применения метода M .

Для реализации (8) определим для каждого агента $a_i \in A$ следующие параметры:

1. «Престиж» агента a_i в момент времени τ – $I_{a_i}^\tau$, $I_{a_i}^\tau \in c_{a_i}^\tau$, где $c_{a_i}^\tau$ – см. формулу (2). Характеризует успешность выполнения агентом подзадачи $t \subset T$ и стабильность получаемых подкреплений, определяется по формуле

$$I_{a_i}^\tau = \sum_{k=\tau_0}^{\tau} r_t \gamma_I(k), \quad (9)$$

где r_t – подкрепление, полученное агентом a_i за выполнение подзадачи t (на интервале $[\tau_0, \tau]$ агент может выполнить достаточно много подзадач и все они учитываются в (9)); γ_I – «коэффициент обесценивания» (позволяет снижать веса подкреплений, полученных за подзадачи, выполненные достаточно давно), определяемый по формуле (7) с показателем «скорости обесценивания» $\beta_I \geq 0$.

Высокий «престиж» агента позволяет говорить о стабильном состоянии его аппаратной составляющей, о высокой производительности его вычислительной системы, о важности (для решаемой задачи) области окружающей среды, в которой он расположен.

Ранее уже упоминались роли, которые могут иметь агенты в зависимости от иерархического положения в установленной вертикальной связи: агент-координатор (назначает агентам-подчиненным подзадачи $t \subset T$, оценивает результаты их выполнения, генерируя подкрепления r_t), агент-подчиненный (выполняет подзадачи $t \subset T$). Показатель «престижа» является индикатором стабильности работы агента и наряду с характеристикой его производительности может рассматриваться при определении кандидатов для назначения роли агента-координатора, удовлетворяющих следующему условию:

$$\frac{\sum_{k=\tau-\tau_{obs}}^{\tau} I_{a_i}^k}{\tau_{obs}} > I_h, \quad (10)$$

где τ_{obs} – продолжительность временного интервала, на котором отслеживается величина показателя «престижа» $I_{a_i}^k$; I_h – пороговое значение «престижа», преодоление которого позволяет рассматривать агента a_i как потенциального агента-координатора (т.е. такому агенту разрешается занимать доминирующее положение в формируемых вертикальных связях).

Примечание. Агентов, не имеющих вертикальных связей, будем называть «свободными агентами».

Однако один агент a_i ($a_i \in A$) может одновременно иметь вертикальные связи, в которых он занимает как доминирующее, так и подчиненное положение. Это возможно в том случае, если он, являясь агентом-координатором для некоторого множества агентов-подчиненных A_{a_i} , $A_{a_i} \subset A$, также находится в подчинении у другого агента-координатора a_j ($a_j \in A$). Таким образом, применим к a_i наименование «агент-координатор уровня h », а к a_j – «агент-координатор уровня $h+1$ » (может иметь в подчинении только агентов-координаторов уровня h). При этом для агента-координатора переход на следующий уровень иерархии возможен при достижении условия (10), где вместо параметра I_h применяется I_{h+1} , $I_{h+1} - I_h = \Delta I$, $\Delta I > 0$.

2. Радиус «публичной зоны» R_{public} (окрестность агента, в которой возможно формирование вертикальных связей) и вероятность формирования вертикальных связей P_{vert} , определяемая по формуле

$$P_{vert} = P_{vert_base} \varepsilon_{dist_v}(s), \quad (11)$$

где P_{vert_base} – вероятность формирования вертикальной связи между агентами a_i и a_j при $s(a_i, a_j) = R_{private}$; $R_{private}$ – радиус «личной зоны» агентов (приближение к агенту на расстояние, меньшее $R_{private}$, несет угрозу его целостности, поэтому агентам запрещен доступ в личные зоны друг друга); s – функция для определения расстояния между агентами; ε_{dist_v} – функция вида (7), монотонно убывающая на интервале $[R_{private}, R_{public}]$, $\varepsilon_{dist_v} \in [1, 0]$ ($R_{private} = \arg \max \varepsilon_{dist_v}(s)$, $R_{public} = \arg \min \varepsilon_{dist_v}(s)$), при этом скорость убывания определяется параметром $\beta_{dist_v} \leq 0$.

Для определения вероятности разрыва вертикальных связей используются формулы [9]:

$$\begin{cases} P_{dest_v} = 0 \text{ при } s(a_i, a_j) < R_{public} \wedge I_{a_i}^{\tau} > I_{sat}, \\ P_{dest_v} = |\varepsilon_{dist_v} - 1| \varepsilon_{inc}, \end{cases} \quad (12)$$

где I_{sat} – минимальная величина «престижа», при которой агент-подчиненный a_i не испытывает желания разорвать вертикальную связь с агентом-координатором a_j ; ε_{inc} – функция вида (7), монотонно убывающая на интервале $[0, I_{sat}]$; $\varepsilon_{inc} \in [1, 0]$, при этом скорость убывания определяется параметром $\beta_{inc} \leq 0$.

3. Радиус «социальной зоны» R_{social} (некоторая окрестность агента, в пределах которой он может устанавливать горизонтальные связи с другими агентами) и вероятность формирования горизонтальных связей P_{hor} , определяемая по формуле

$$P_{hor} = P_{hor_base} \varepsilon_{dist_h}(s), \quad (13)$$

где – вероятность формирования горизонтальной связи между агентами a_i и a_j при $s(a_i, a_j) = R_{private}$; ε_{dist_h} – функция вида (7), монотонно убывающая на интервале $[R_{private}, R_{social}]$, $\varepsilon_{dist_h} \in [1, 0]$, при этом скорость убывания определяется параметром $\beta_{dist_h} \leq 0$.

Горизонтальные связи будут автоматически разрываться при условии

$$s(a_i, a_j) > R_{social}. \quad (14)$$

Таким образом, множество правил формирования вертикальных и горизонтальных связей между агентами описывается следующими варьируемыми параметрами:

$$H_K = \{\beta_I, I_h, \Delta I, R_{public}, P_{vert_base}, \beta_{dist_v}, I_{sat}, \beta_{inc}, R_{social}, P_{hor_base}, \beta_{dist_h}\}, \quad (15)$$

где β_I , β_{dist_v} , β_{inc} , β_{dist_h} – параметры, позволяющие управлять скоростью обесценивания соответствующих показателей; I_h , ΔI – параметры, регламентирующие величину «престижа», необходимого для занятия агентом доминирующего положения в вертикальной связи; R_{public} , P_{vert_base} , β_{dist_v} , I_{sat} , β_{inc} – параметры, регулирующие условия установления и разрыва вертикальных связей; R_{social} , P_{hor_base} , β_{dist_h} – параметры, регулирующие условия установления и разрыва горизонтальных связей.

Процесс функционирования МАС S , включающей множество агентов A , основанной на рассмотренных принципах, предусматривает выполнение следующих шагов:

1) назначение МАС задачи T , а также H_K (множество базовых параметров архитектуры МАС (см. (15)), ее «геном»);

2) исследование агентами (свободный агент, если он не имеет вертикальных связей) $a_i \in A$ незнакомой окружающей среды E , набор опыта в формате (5). Каждый агент $a_i \in A$ устанавливает горизонтальные связи с другими агентами $a_j \in A$ с вероятностью P_{hor} (см. (13)) с целью обмена опытом, при этом их разрыв происходит в случае (14) (т.е. когда агенты покинули социальные зоны друг друга);

3) свободные агенты выделяют подзадачи $t \subset T$, которые выполняют без согласования друг с другом (т.е. несколько агентов могут выполнять одновременно одну и ту же подзадачу). По результатам выполнения подзадач t свободные агенты назначают себе подкрепления r_i ;

4) по мере увеличения «престижа» $I_{a_i}^T$ (см. формулу (9)) агенты a_i устанавливают вертикальные связи с агентами a_j с вероятностью P_{vert}

(см. формулу (11)) при выполнении условия (10). Таким образом, a_i получают роль «агент-координатор», a_j – «агент-подчиненный». При этом разрыв вертикальной связи может произойти с вероятностью P_{dest_v} (см. формулу (12)) в следующих случаях: агент-подчиненный получает мало заданий (или вовсе их не получает, что возможно в следующих случаях: агент-координатор вышел из строя и не распределяет задания, $|t_{a_i}| < |A_{a_i}|$), агент-подчиненный находится на существенном расстоянии от агента-координатора (или вышел за пределы его публичной зоны);

5) агент-координатор a_i выполняет декомпозицию подзадачи t_{a_i} ($t_{a_i} \subset T$) на подзадачи t_{a_j} ($t_{a_j} \subset t_{a_i}$), которые назначает своим агентам-подчиненным a_j (с учетом текущего положения агентов-подчиненных в окружающей среде, в пределах публичной зоны агента-координатора). По результатам выполнения подзадач агент-координатор назначает агентам-подчиненным подкрепление $r_{t_{a_j}}$ (с учетом вклада каждого агента-подчиненного в решение подзадачи t_{a_i}), которое учитывается в (9). Агент-координатор a_i за выполнение подзадачи t_{a_i} получает подкрепление $r_{t_{a_i}}$ от агента-координатора уровня $h+1$ (при его отсутствии назначает себе подкрепление самостоятельно);

6) агент-координатор уровня h получает роль агента-координатора уровня $h+1$ при выполнении условия (10) (при пороговом значении I_{h+1}) в случае установления вертикальной связи с другим агентом-координатором уровня h . При этом радиус его публичной зоны изменяется пропорционально ΔI , также разрываются вертикальные связи со всеми его агентами-подчиненными, не являющимися агентами-координаторами уровня h ;

7) шаги 2–6 повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто условие выполнения задачи T .

Замечание. Очевидно, что в условиях еще неисследованной окружающей среды подкрепление, получаемое агентами, будет чаще всего отрицательным ($r_t < 0$). Таким образом, при статическом пороговом значении $I_h > 0$ (см. формулу (10)) ни один из агентов на начальном этапе исследования окружающей среды не сможет устанавливать вертикальные связи. Для устранения обозначенной проблемы установим варьируемое пороговое значение $I_h = f(r_p)$, где r_p (см. формулу (6)) вычисляется для подкреплений, получаемых за выполнение подзадач t (r_t); аналогичный подход может быть применен и к показателю I_{sat} (см. формулу (12)).

Определение оптимальных параметров МАС для окружающей среды конкретного типа может быть реализовано с помощью генетического алгоритма [10], при этом «хромосома» имеет вид, соответствующий (15), при этом из нее исключены параметры P_{vert_base} и P_{hor_base} (приняты значения $P_{vert_base} = 1$, $P_{hor_base} = 1$), частично дублирующие функции R_{public} и

R_{social} . В качестве функции приспособленности «хромосом» может быть использован параметр τ_N – время, за которое МАС S была выполнена поставленная задача T .

Результаты

Цель эксперимента: в результате выполнения компьютерного моделирования доказать эффективность применения предложенного метода синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической МАС.

Основные параметры эксперимента:

1. Описание внешней среды: виртуальный лабиринт, имеющий размерность 150×150 клеток, построенный в среде Microsoft Unity (фрагмент лабиринта представлен на рис. 1). При этом под клеткой понимается квадратная область (проходимая или непроходимая), размеры которой соответствуют габаритам агента. Из непроходимых клеток формируются препятствия. При этом все проходимые клетки должны быть достижимы для агентов. Структура лабиринта динамически изменяется с периодичностью 1 клетка в 10 с. Также допускается одновременное изменение существенной части лабиринта (до 25 % клеток изменяют состояние на противоположное) с периодичностью не более одного раза на 100 итераций.

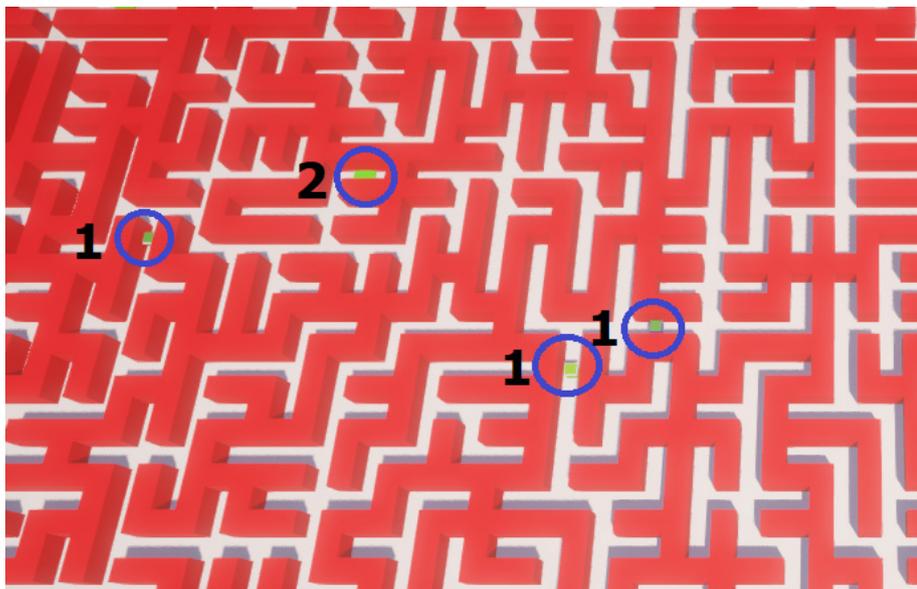


Рис. 1. Фрагмент построенного виртуального лабиринта:
1 – агенты; 2 – целевое состояние

2. Описание решаемой задачи: поиск агентами в лабиринте генерируемых целевых состояний (100 шт.), координаты которых определяются случайным образом. При этом одновременно на карте может находиться не более пяти целевых состояний. С целью имитации выхода из строя выполняется ограничение мобильности (обездвижение) случайных агентов на 10–30 с, при этом одновременно может быть обездвижено не более 10 % агентов. Агенты-подчиненные получают штраф к подкреплению в случае повторения траекто-

рий друг друга (при этом размер штрафа уменьшается с течением времени с момента последнего прохода агента по данной траектории). Карта окружающей среды (со всеми изменениями), координаты стартовых положений агентов и целевых состояний (генерируются случайным образом) повторяются для всех тестируемых методов.

3. Число, типы применяемых агентов: всего 40 шт. При этом агенты генерируются в следующих комплектациях (в зависимости от возможностей вычислительной системы): потенциальные агенты-координаторы (имеют наиболее производительную вычислительную систему) – 5 шт.; агенты, имеющие вычислительную систему со средней производительностью (могут стать как агентами-координаторами, так и агентами-подчиненными) – 5 шт., потенциальные агенты-подчиненные (имеют вычислительную систему с низкой производительностью) – 30 шт. Моделирование различных уровней производительности вычислительной системы осуществлялось путем применения задержки при выполнении алгоритмов функционирования агентов (при назначении задач, а также при расчете подкреплений на каждого агента-координатора генерировалась задержка в 0,3 с).

4. Число итераций (попыток): 300. При этом итерация считается выполненной в случае достижения критерия решения задачи – обнаружение всех целевых состояний.

5. Критерий оценки эффективности метода: время выполнения одной итерации (τ_N).

Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 2.

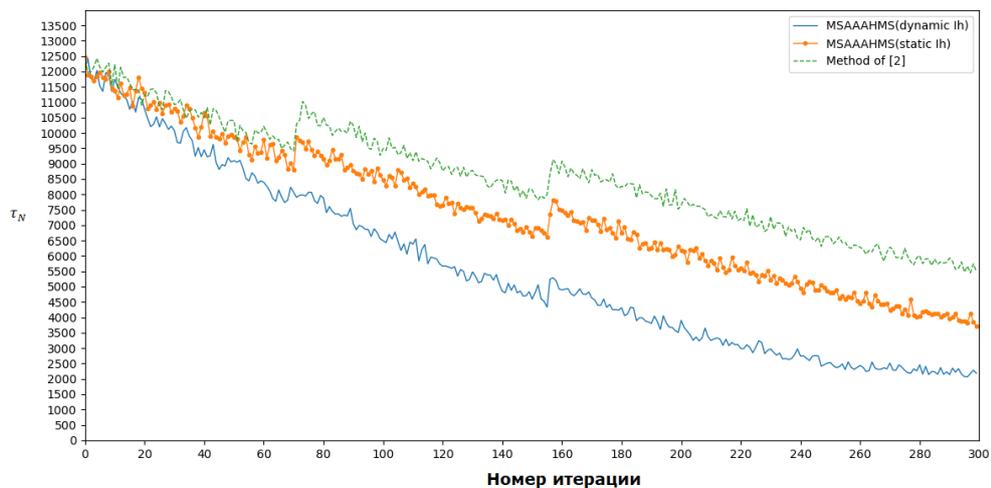


Рис. 2. Результаты эксперимента

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения: MSAAAHMS (dynamic I_h) – предложенный метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической MAC с варьируемым пороговым значением I_h; MSAAAHMS (static I_h) – предложенный метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической MAC с постоянным значением I_h; Method of [2] – статическая иерархическая структура MAC, описанная в [2].

Обсуждение

Как видно на рис. 2, предложенный метод MSAAAHMS (static Ih) позволил получить к 300-й итерации результаты на 30 % лучшие, чем в случае применения аналогичного решения [2]. При этом добавление возможности динамического изменения порогового значения I_h (метод MSAAAHMS (dynamic Ih)) позволило увеличить выигрыш вдвое. Метод MSAAAHMS (dynamic Ih) также показал также большую устойчивость к резкому изменению структуры лабиринта (см. резкий рост показателя τ_N между 60–80 и 140–160 итерациями).

Предложенный метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической МАС удовлетворяет критериям, приводимым в начале статьи, а именно:

1. Модификация базовых правил, определяющих условия возникновения связей путем воздействия на параметры I_h , ΔI , P_{vert_base} , R_{public} , β_{dist_v} , I_{sat} , β_{inc} (для вертикальных связей), R_{social} , P_{hor_base} , β_{dist_h} (для горизонтальных связей).

2. Автоматическая модификация множества связей в процессе функционирования МАС осуществляется в зависимости от следующих показателей: «престиж» $I_{a_i}^\tau$ агента, расстояние между агентами $s(a_i, a_j)$.

3. Число моделируемых типов архитектур составляет 3 и более, а именно:

– при $I_{sat} < I_{a_i}^{\tau_{min}}$ ($I_{a_i}^{\tau_{min}}$ – минимальное значение «престижа», достижимое для агента), $\beta_{dist_v} = 0$, $\beta_{inc} = 0$ и величине R_{public} , достаточной для покрытия всей окружающей среды, формируется архитектура типа «конгрегация», предусматривающая создание долговременных групп агентов [1];

– при значениях $I_h + \Delta I$, достижимых для агентов, формируется архитектура с несколькими уровнями иерархии (соответствует архитектуре типа «иерархия» в [1], предполагающей древовидную структуру МАС);

– при истинности условия

$$\begin{cases} R_{public} = R_{private} \vee P_{vert_base} = 0 \vee P_{vert_base} = 0 \vee I_h > I_{a_i}^{\tau_{max}}, \\ R_{social} \neq 0 \wedge P_{hor_base} \neq 0, \end{cases} \quad (16)$$

где $I_{a_i}^{\tau_{max}}$ – максимальное значение «престижа», достижимое для агента, архитектура МАС соответствует «коалиции» (агенты не образуют вертикальных связей) [1];

– при

$$R_{public} > R_{private} \wedge R_{public} > R_{private} \wedge I_h < I_{a_i}^{\tau_{max}}, \quad (17)$$

а также истинности второго условия из (16) архитектура МАС соответствует «команде» (агенты образуют как вертикальные, так и горизонтальные связи) [1];

– при истинности условия (17) и ложности второго условия из (16) агенты образуют «федерацию» (наличие вертикальных связей при отсутствии горизонтальных).

4. Определение оптимальных параметров МАС для окружающей среды конкретного типа может осуществляться с помощью генетического алгоритма, при этом вид «хромосома» формируется на основе множества (16).

Заключение

В результате был разработан метод синтеза и автоматической адаптации архитектуры иерархической многоагентной системы, характеризующийся наличием автоматической модификация множества связей в процессе функционирования МАС (а также базовых правил, определяющих условия возникновения связей), возможностью определения оптимальных параметров МАС для конкретной окружающей среды с помощью генетического алгоритма, а также способностью к моделированию следующих типов архитектур МАС: «конгрегация», «иерархия», «коалиция», «команда», «федерация» [1].

Разработанный метод может найти свое практическое применение при реализации следующих задач: обследование (или патрулирование) мобильными роботами инфраструктурных объектов; реализация искусственного интеллекта в компьютерных играх.

Список литературы

1. Horling B., Lesser V. A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms // The Knowledge Engineering Review. 2005. Vol. 19 (04). P. 281–316.
2. Ling Yu, Zhiqi Shen, Chunyan Miao, Victor Lesser. Genetic Algorithm Aided Optimization of Hierarchical Multi-Agent System Organization // The Tenth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2011). Taipei, Taiwan, 2011.
3. Дубенко Ю. В., Дышкант Е. Е., Обозовский А. А. Метод синтеза организационной структуры централизованных многоагентных систем с возможностью ее автоматической адаптации в случае изменения параметров окружающей среды или поставленной задачи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 18–30.
4. Bistaffa F., Farinelli F., Cerquides J., Rodríguez-Aguilar J., Ramchurn S. D. Anytime Coalition Structure Generation on Synergy Graphs // 2014 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent System. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/269092245_Anytime_coalition_structure_generation_on_synergy_graphs (дата обращения: 22.09.2023).
5. Дубенко Ю. В., Дышкант Е. Е., Обозовский А. А. Метод автоматической реорганизации структуры многоагентных систем, основанный на применении алгоритма симулированного закаливания // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 1. С. 5–18.
6. Rahwan T., Michalak T. P. Coalition Structure Generation on Graphs // Artificial Intelligence. 2014. doi: 10.48550/arXiv.1410.6516
7. Ghrieb N., Mokhati F., Tahar G. Maintaining Organizational Multi-agent Systems: A Reorganization-based Preventive Approach // 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. 2021. URL: <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0010314803840389> (дата обращения: 04.10.2024).

8. Mahani M. N. Strategic Structural Reorganization in Multi-agent Systems Inspired by Social Organization Theory : PhD dissertation ; discipline – Electrical Engineering & Computer Science. University of Kansas, 2012. 105 p.
9. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 344 с.
10. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации / пер. с англ. А. В. Логунова. М. : ДМК Пресс, 2020. 1002 с.
11. Саттон Р. С., Барто Э. Дж. Обучение с подкреплением: введение : практическое руководство / пер. с англ. А. А. Слинкина. 2-е изд. М. : ДМК Пресс, 2020. 552 с.

References

1. Horling B., Lesser V.A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. *The Knowledge Engineering Review*. 2005;19(04):281–316.
2. Ling Yu, Zhiqi Shen, Chunyan Miao, Victor Lesser. Genetic Algorithm Aided Optimization of Hierarchical Multi-Agent System Organization. *The Tenth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2011)*. Taipei, Taiwan, 2011.
3. Dubenko Yu.V., Dyshkant E.E., Obozovskiy A.A. A method of the organizational structure synthesis of centralized multi-agent system with a possibility of its automatic adaptation in the event of changing the environment parameters or the set task. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(3):18–30. (In Russ.)
4. Bistaffa F., Farinelli F., Cerquides J., Rodríguez-Aguilar J., Ramchurn S.D. Anytime Coalition Structure Generation on Synergy Graphs. *2014 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent System*. 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/269092245_Anytime_coalition_structure_generation_on_synergy_graphs (accessed 22.09.2023).
5. Dubenko Yu.V., Dyshkant E.E., Obozovskiy A. . A method for automatic reorganization of the structure of multi-agent systems, based on the application of the simulated hardening algorithm. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(1):5–18. (In Russ.)
6. Rahwan T., Michalak T.P. Coalition Structure Generation on Graphs. *Artificial Intelligence*. 2014. doi: 10.48550/arXiv.1410.6516
7. Ghrieb N., Mokhati F., Tahar G. Maintaining Organizational Multi-agent Systems: A Reorganization-based Preventive Approach. *13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. 2021. Available at: <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0010314803840389> (accessed 04.10.2024).
8. Mahani M.N. Strategic Structural Reorganization in Multi-agent Systems Inspired by Social Organization Theory: PhD dissertation; discipline – Electrical Engineering & Computer Science. University of Kansas, 2012:105.
9. Mesarovich M., Mako D., Takakara I. *Teoriya iyerarkhicheskikh mnogourovnevnykh system = Theory of hierarchical multilevel systems*. Moscow: Mir, 1973:344. (In Russ.)
10. Saymon D. *Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii = Evolutionary optimization algorithms*. Transl. from Eng. by A.V. Logunov. Moscow: DMK Press, 2020:1002. (In Russ.)
11. Satton R.S., Barto E.Dzh. *Obucheniye s podkrepleniyem: vvedeniye: prakticheskoye rukovodstvo = Reinforcement learning: an introduction: a practical guide*. Transl. from Eng. by A.A. Slinkin. 2nd ed. Moscow: DMK Press, 2020:552. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Владимирович Дубенко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информатики
и вычислительной техники,
Кубанский государственный
технологический университет
(Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: scorpioncool1@yandex.ru

Yuriy V. Dubenko

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the sub-
department of informatics and computer
engineering, Kuban State Technological
University (2 Moskovskaya street,
Krasnodar, Russia)

Евгений Евгеньевич Дышкант

кандидат технических наук,
доцент кафедры внутризаводского
электрооборудования и автоматизации,
Армавирский механико-технологический
институт (филиал) Кубанского
государственного технологического
университета (Россия, Краснодарский
край, г. Армавир, ул. Кирова, 127)

E-mail: ed0802@yandex.ru

Evgeniy E. Dyshkant

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of inplant electrical equipment
and automation, Armavir Mechanical
and Technological Institute (branch)
of the Kuban State Technological
University (127 Kirova street, Armavir,
Krasnodar region, Russia)

Владислав Анатольевич Демидов

аспирант, Кубанский государственный
технологический университет
(Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: demidov_vladislav96@mail.ru

Vladislav A. Demidov

Postgraduate student, Kuban State
Technological University
(2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 17.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.02.2025

Принята к публикации / Accepted 03.03.2025

УДК 004.424

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-5

Метод выбора рационального состава функционального программного обеспечения бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов в экстремальных условиях

К. А. Суминов

Институт электронных управляющих машин имени И. С. Брука, Москва, Россия

konstantin.a.suminov@mcst.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Ключевую роль в функционировании робототехнических комплексов (РТК) играют бортовые вычислительные системы (БВС), обеспечивающие переход от дистанционного управления к полу- и полностью автономным системам. Такой переход требует повышения сложности и адаптивности аппаратных и программных компонентов. Ввиду большого разнообразия решений с аппаратной, алгоритмической, архитектурной и других сторон, а также ограниченности вычислительных ресурсов БВС РТК выбор рационального состава функционального программного обеспечения при реконфигурации в процессе функционирования является нетривиальной задачей. *Материалы и методы.* Представлен метод выбора рационального состава функционального программного обеспечения БВС РТК в экстремальных условиях, который позволяет выбрать рациональную конфигурацию системы в зависимости от требований к решению поставленных задач исходя из текущего состояния внешней среды, внутреннего состояния БВС РТК и имеющихся ограничений. *Результаты и выводы.* Метод работает над многоверсионными библиотеками функциональных программ БВС РТК. Метод использует решение обобщенной задачи о мультипликативном многомерном рюкзаке с мультивыбором и дополнительными ограничениями. Такой подход позволяет учитывать сложные зависимости между элементами функционального программного обеспечения.

Ключевые слова: многоверсионное программирование, альтернативные решения, реконфигурация, бортовые вычислительные системы, робототехнические комплексы, БВС РТК, БВС Эльбрус, рациональный состав функционального программного обеспечения

Для цитирования: Суминов К. А. Метод выбора рационального состава функционального программного обеспечения бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов в экстремальных условиях // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 55–66. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-5

A method for selecting the rational composition of functional software for onboard computing systems of robotic complexes under extreme conditions

K.A. Suminov

Institute of Electronic Control Machines named after I.S. Bruk, Moscow, Russia

konstantin.a.suminov@mcst.ru

Abstract. *Background.* On-board computing systems (OCS) play a key role in the functioning of robotic complexes (RC), ensuring the transition from remote control to semi- and

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

fully autonomous systems. This transition requires increased complexity and adaptability of hardware and software components. Due to the wide variety of solutions from the hardware, algorithmic, architectural and other aspects, as well as the limited computing resources of the UAV RTK, the choice of a rational composition of functional software during reconfiguration during operation is a non-trivial task. *Materials and methods.* A method for selecting a rational composition of the functional software of the UAV RTK in extreme conditions is presented, which allows selecting a rational configuration of the system depending on the requirements for solving the assigned tasks based on the current state of the external environment, the internal state of the UAV RTK and the existing limitations. *Results and conclusions.* The method works on multi-version libraries of functional programs of the UAV RTK. The method uses the solution of the generalized problem of a multiplicative multidimensional knapsack with multichoice and additional constraints. This approach allows taking into account complex dependencies between elements of functional software.

Keywords: multiversion programming, alternative solutions, reconfiguration, onboard computing systems, robotic complexes, UAV RTK, Elbrus microprocessors, Rational composition of functional software

For citation: Suminov K.A. A method for selecting the rational composition of functional software for onboard computing systems of robotic complexes under extreme conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):55–66. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-5

Введение

Развитие робототехники стремительно прогрессирует, что обусловлено повсеместной востребованностью робототехнических комплексов (РТК) в различных прикладных задачах. Современная техника всех видов, включая РТК, особенно активно развивается в области бортовых вычислительных систем (БВС). Для решения актуальных задач РТК становятся все более самостоятельными, переходя от дистанционного управления к полу- и полностью автономным системам [1], что неизбежно приводит к усложнению всех их компонентов [2].

БВС РТК часто состоят из множества вычислителей [3], которые могут отличаться своим предназначением (графический вычислитель, тензорный вычислитель и др.), архитектурой, вычислительными способностями.

При построении РТК, кроме большого множества альтернативных решений, с аппаратной стороны существует большое разнообразие программных реализаций алгоритмов, используемых для решения задач, ставящихся перед РТК. Кроме статических, существуют динамические аспекты, возникающие в ходе эксплуатации РТК. Так, в процессе эксплуатации могут меняться приоритеты самих задач и требования к качеству их выполнения (повышение точности при прицеливании и т.д.). Кроме того, могут меняться внешние по отношению к РТК условия – сменилась погода, и внутренние – выход из строя вычислителя, перегрев узла и т.д.

Это порождает огромный выбор альтернативных решений, и возникает задача как определения исходной конфигурации, так и поиска наиболее рациональной конфигурации в сложившихся условиях при большом количестве параметров в процессе функционирования РТК. При этом в качестве критерия рациональности может выступать, например, живучесть РТК [4]. Обеспечение возможности решения такой задачи достигается созданием множества альтернативных решений для задач РТК с использованием многоверсионного программирования [5].

Примером могут служить ситуации, возникающие в применении РТК наземного РТК класса. На этапе создания, в зависимости от его массогабаритных характеристик, ставящихся требований и общих условий эксплуатации, необходимо определить аппаратную конфигурацию БВС. После начала выполнения поставленного задания (например, добраться с грузом из пункта А в пункт Б) могут возникать нештатные ситуации, в том числе ввиду преднамеренного воздействия. Так, при штатном движении может использоваться режим скрытности, при котором необходимо в соответствии с приоритетом выбрать программную компоновку, обеспечивающую наилучший показатель качества распознавания. При возникновении ситуации обнаружения РТК переходит в режим побега, при котором необходимо в соответствии с приоритетом выбрать компоновку функционального программного обеспечения (ФПО), обеспечивающую наилучший показатель скорости движения. При возникновении ситуации отказа одного из вычислителей БВС необходимо выполнить перераспределение решаемых задач между оставшимися вычислителями, максимизировав показатель качества в соответствии с приоритетом и т.д.

При переходе в каждое следующее состояние, характеризующееся своим приоритетом, необходимо менять конфигурацию для достижения наилучших показателей, одновременно с этим необходимо поддерживать минимально допустимые требования по всем характеристикам. То есть нельзя выбрать компоновку, обеспечивающую максимальную скорость, при которой качество распознавания будет неприемлемым. Данная задача является легко решаемой при наличии неограниченных ресурсов, но в реальных ситуациях ввиду ограничений необходимо осуществлять выбор конфигурации и состава ФПО БВС РТК. Сам же выбор строится на основе метода выбора рационального состава ФПО БВС РТК в экстремальных условиях, строящегося на использовании паспортов альтернативных решений, в полной мере опираясь на математический аппарат системного анализа [6].

Метод выбора рационального состава функционального программного обеспечения бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов в экстремальных условиях

Метод выбора рационального состава работает над многоверсионными библиотеками функциональных программ БВС РТК и может быть представлен следующими шагами:

- сформировать многоверсионные библиотеки ФПО БВС РТК;
- провести предварительную фильтрацию решений из многоверсионной библиотеки функциональных программ;
- сформировать математическую модель решателя по описанным требованиям;
- программно реализовать математическую модель решателя;
- применить выполненную реализацию над полученными результатами фильтрации;
- обработать результаты.

Рассмотрим подробно каждый из пунктов, а также выполним краткое описание метода формирования многоверсионных библиотек функциональных программ БВС РТК.

Метод формирования многоверсионных библиотек функциональных программ бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов

Построение множества альтернативных решений и их паспортов состоит из следующих этапов:

- определение перечня задач, ставящихся перед РТК;
- реализация множества альтернативных решений;
- определение перечня параметров и зависимостей для реализованных частных решений;
- проведение экспериментальных исследований с целью определения характеристик разработанных частных решений;
- построение паспортов моделей.

• *Определение перечня задач, ставящихся перед РТК*, – целевая задача, должна быть декомпозирована на конечное число подзадач. Каждая такая подзадача, в свою очередь, может включать конечное число более мелких частей и т.д. При этом стоит отметить, что такие элементы функционируют не изолированно друг от друга, а взаимодействуют как система, в которой свойства одного зависят как от внешних сложившихся условий, так и от условий, определяемых поведением других элементов.

• *Реализация множества альтернативных решений* – для каждой задачи T_i разработать множество альтернативных решений S_i :

$$S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{iC_i}\}, \quad (1)$$

где S_{ij} – частное решение задачи T_i ; C_i – количество решений для i -й задачи. Альтернативные решения могут различаться по следующим аспектам: алгоритмические подходы, языки программирования, программные библиотеки и их версии, архитектурные решения.

• *Определение перечня параметров и зависимостей для реализованных частных решений* – чтобы осуществлять выбор между различными алгоритмами, необходимо иметь параметры, по которым их сравнивать. В данном случае рассматриваются два типа параметров: категориальные и функциональные [7].

Категориальные параметры могут принимать значение из определенного множества значений. Примером таких параметров может служить характеристика алгоритма, на каком вычислителе он может быть исполнен (E2K, X86) или версия необходимой библиотеки для исполнения данного алгоритма (OpenCV Version ≥ 3.2).

Функциональные параметры представляют собой функцию, описывающую потребление ресурса, например памяти, в зависимости от параметров алгоритма.

• *Проведение экспериментальных исследований* с целью определения характеристик разработанных частных решений путем статистической обработки экспериментальных данных результатов моделирования.

• *Построение паспортов моделей* – на основе проведенных экспериментальных исследований и определенных характеристик решений необходимо составить некоторый «паспорт модели». Пример таблицы с такими «паспортами» для M задач в общем виде представлен в табл. 1.

Таблица 1

Пример таблицы с паспортами решений для М задач

Задача	1					2	...	М
Номер параметра	Тип	Решение 1	Решение 2	...			...	...
1	a	$f_{111}(\overline{x_{111}})$	$f_{121}(\overline{x_{121}})$	...	$f_{1C_11}(\overline{x_{1C_11}})$	...	...	$f_{MC_{M1}}(\overline{x_{MC_{M1}}})$
...
j	a	$f_{11z}(\overline{x_{11z}})$	$f_{12z}(\overline{x_{12z}})$	...	$f_{1C_1z}(\overline{x_{1C_1z}})$	...	...	$f_{MC_{Mz}}(\overline{x_{MC_{Mz}}})$
$j+1$	b	x_{111}	x_{121}	...	x_{1C_11}$	...	...	x_{MC_{M1}}$
...
N	b	x_{11N-z}	x_{12N-z}	...	x_{1C_1N-z}$	...	...	x_{MC_{MN-z}}$

Предварительная фильтрация решений

Основной целью применения предварительной фильтрации является **обеспечение соответствия текущим условиям**, т.е. отбор решений, которые могут быть применены в заданных внешних и внутренних условиях с целью **сокращения пространства поиска**. Исключение альтернатив, которые противоречат ограничениям РТК, позволяет получить **снижение вычислительных затрат**, что непосредственно влечет уменьшение времени для последующих этапов.

Фильтрация выполняется на основе анализа многоверсионной библиотеки функциональных программ и построения матрицы подходящих решений в соответствии с вектором текущего состояния БВС и РТК.

Формирование математической модели решателя

В основе выбора решения, удовлетворяющего ресурсам, оптимального по какому-либо критерию, лежит обобщенная задача о мультипликативном многомерном рюкзаке с мультивыбором [8] и дополнительными ограничениями, что каждый класс может быть представлен только в одном рюкзаке, и из каждого класса можно взять не более одного предмета. Кроме того, следует учесть, что некоторые решения могут зависеть от решений другого класса задач, а также требуют решения задач, являющихся для них вспомогательными, но не представляющими ценности в обособленном виде. То есть при решении необходимо рассматривать вспомогательные решения и учитывать топологические зависимости между решениями. Рассмотрим формулировку задачи в контексте имеющейся задачи выбора рационального состава ФПО БВС РТК.

Пусть имеется:

- Множество вспомогательных решений $\{d_1, d_2, \dots, d_t\}$, где t – количество вспомогательных решений. Каждое вспомогательное решение d_i , $i=1, 2, \dots, t$, имеет: m различных характеристик потребления ресурсов;

$w_{ij} \geq 0$ – значение потребления ресурса j -го типа для решения i , $j = 1, 2, \dots, m$; вектор состояния Sd_i длиной P , содержащий необходимые зависимости по библиотекам, архитектуре вычислителя и др.

• Множество основных решений $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, где n – количество основных решений, каждое решение r_i , $i = 1, 2, \dots, n$, имеет: критерий качества $v_i \geq 0$, m различных характеристик потребления ресурсов, $w'_{ij} \geq 0$ – значение потребления ресурса j -го типа для решения i , $j = 1, 2, \dots, m$. Также для каждого i -го основного решения определено множество зависимостей $Dr_i \subseteq \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \setminus \{r_i\}$ от других основных решений и $Dr_i \subseteq \{d_1, d_2, \dots, d_v\}$, от вспомогательных задач, вектор состояния Sr_i длиной P , содержащий необходимые зависимости по библиотекам, архитектуре вычислителя и др.

Все n основных решений разбиты на k классов задач G_1, G_2, \dots, G_k . Каждое решение может принадлежать только одному классу, т.е. множества G_a , $a = 1, 2, \dots, k$, являются непересекающимися,

Также имеется x вычислителей, каждый вычислитель имеет: ограничение на объем по потребляемому ресурсу, w''_{ij} – ограничение на ресурс j -го типа для вычислителя i , $j = 1, 2, \dots, m$, $i = 1, 2, \dots, x$; вектор состояния Sx_i длиной P , содержащий значения, определенные на данном вычислителе значения для зависимостей решений (версии программных библиотек на борту, архитектуры вычислителя и др.).

Все j типов ресурсов для вспомогательных решений, основных решений и имеющиеся в вычислителях совпадают между собой.

В таком случае необходимо найти набор основных и вспомогательных решений, распределенных по вычислителям с общим максимальным критерием качества, соблюдая при этом ограничение по суммарному потреблению ресурса каждого типа для каждого вычислителя и ограничение, что из каждого класса основных решений можно взять только одно решение и один раз, каждый класс задач может быть представлен только в одном вычислителе. Решения из множества вспомогательных решений рассматриваются как дополнения к зависимому от них основному решению и рассматриваются к обязательному размещению на вычислителе только при размещении соответствующего основного решения. Основное решение может быть размещено, только если все его зависимости также размещены к выполнению на вычислителях.

Таким образом, для применения рассматриваемого метода необходимо сформировать математическую модель решателя в соответствии с описанной постановкой задачи поиска и применить ее программную реализацию к отфильтрованному множеству решений, после чего обработать полученные наборы.

Практика и результаты

В рамках проводимых в Институте электронных управляющих машин имени И. С. Брука работ был реализован такой подход с использованием многоверсионного программирования для некоторых основных задач назем-

ных РТК. Эксперимент проводился для БВС, построенной на основе двух микропроцессоров серии «Эльбрус», а именно «Эльбрус-8С» и «Эльбрус-2С3» [9, 10], На рис. 1 представлена структурная схема рассматриваемой БВС.

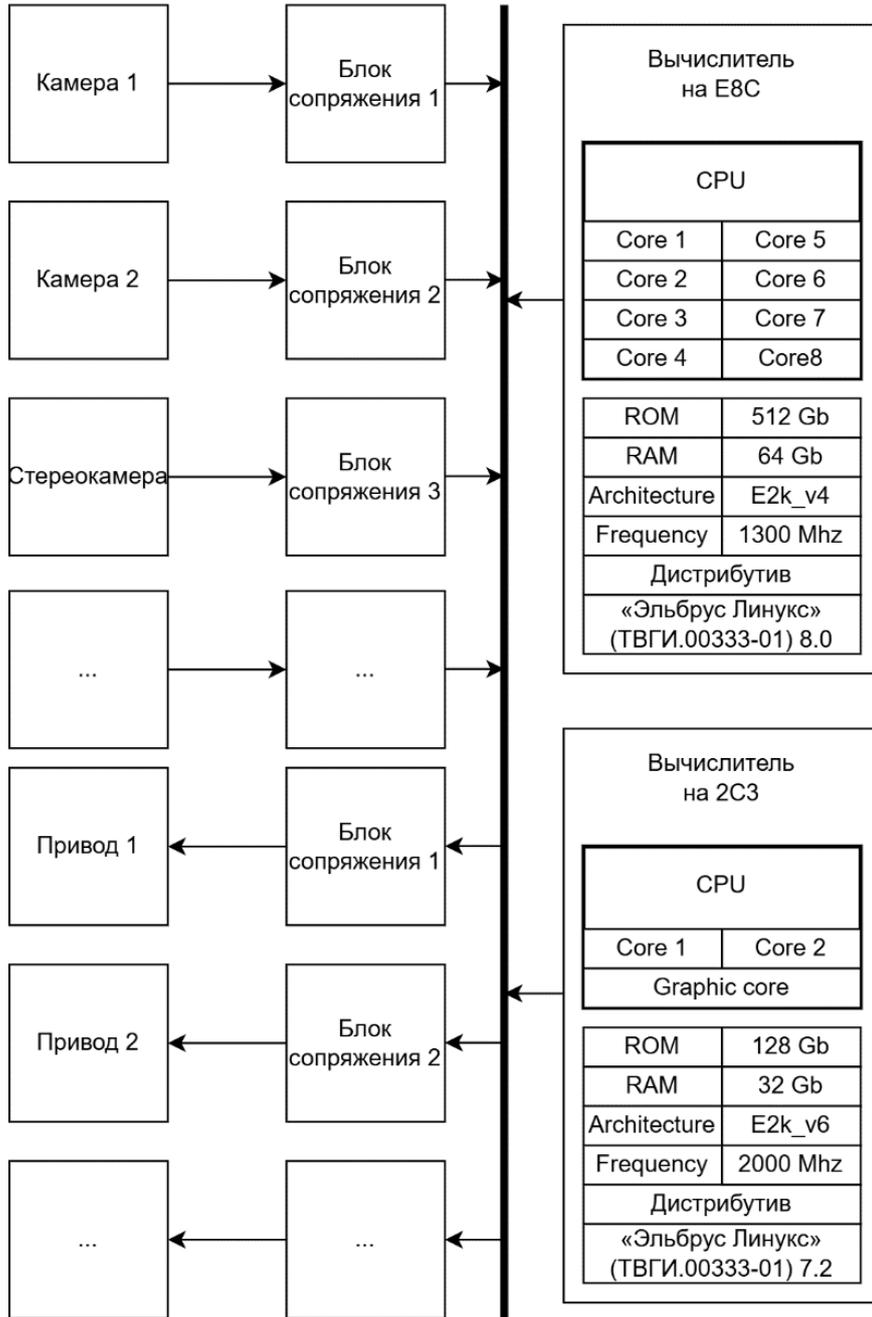


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемой БВС

В результате построения множества альтернативных решений было получено 662 различных частных решений для 8 классов решаемых задач: задачи обнаружения объектов, анализа текстур, сегментации изображений, стерео-

реконструкции [11], распознавания объектов, поиска геометрических примитивов, конструирования графа проходимости, поиска пути на графе проходимости.

По результатам проведенных экспериментов для каждого частного решения был получен паспорт с его характеристиками, функциональными зависимостями. Каждое решение описывается 57 различными функциональными и категориальными параметрами.

Было проведено моделирование для двух сценариев применения наземного РТК на примере РТК класса тележка. Сценарий 1 представляет собой последовательность повторяющихся состояний, принимаемых РТК, которая соответствует режиму функционирования без изменения приоритетов для выполняемых задач. Сценарий 2 представляет собой последовательность различных состояний, принимаемых РТК, которая соответствует режиму функционирования с изменением приоритетов для выполняемых задач. Переход между состояниями в каждом из сценариев содержит вероятность отказа вычислителя БВС РТК.

С помощью разработанного метода и программных средств получены оценки увеличения живучести РТК с БВС на основе микропроцессоров отечественного производства серии «Эльбрус» от 1,2 до более чем в 20 раз. На рис. 2,*а* приведен график оценки живучести для сценария 1 с и без использования метода, их отношения показаны на рис. 2,*б* в зависимости от вероятности отказа (в процентах).

Видно, что при нулевой вероятности отказов при переходах между состояниями живучесть остается неизменной, что связано с постоянным приоритетом при функционировании РТК и неизменной конфигурацией БВС РТК. При повышении вероятности отказов при переходах живучесть с использованием разработанного метода становится выше, чем без его использования, что обусловлено тем, что при неизменных приоритетах меняется объем доступных ресурсов. При выходе из строя вычислительного комплекса (ВК) БВС РТК без изменения состава ФПО БВС РТК все задачи, выполняемые на вышедшем из строя вычислительном комплексе, становятся недоступны, при изменении же состава ФПО БВС РТК подбирается компоновка, покрывающая все задачи исходя из доступных ресурсов.

На рис. 3,*а* приведен график оценок живучести для сценария 2 в зависимости от вероятности отказа вычислительных узлов. Оценки приведены для случаев с использованием разработанных средств и без них. На рис. 3,*б* приведен график отношения указанных оценок в зависимости от вероятности отказа вычислительных узлов.

Видно, что при сценариях с изменяемыми приоритетами в процессе функционирования, даже при нулевой вероятности отказов, и соответственно, неизменной конфигурации БВС РТК, живучесть с использованием разработанного метода значительно выше, чем без его использования. Это обусловлено тем, что при исходной конфигурации учитывается лишь один стартовый приоритет РТК, с использованием же метода при каждом изменении состав ФПО БВС РТК выбирается так, чтобы максимизировать соответствующий текущему состоянию приоритет. При увеличении вероятности отказа разница становится еще более значительной (более чем 20 раз), что так же, как и для сценария 1, обусловлено выбором состава ФПО БВС РТК исходя из новой конфигурации вычислительного комплекса БВС.

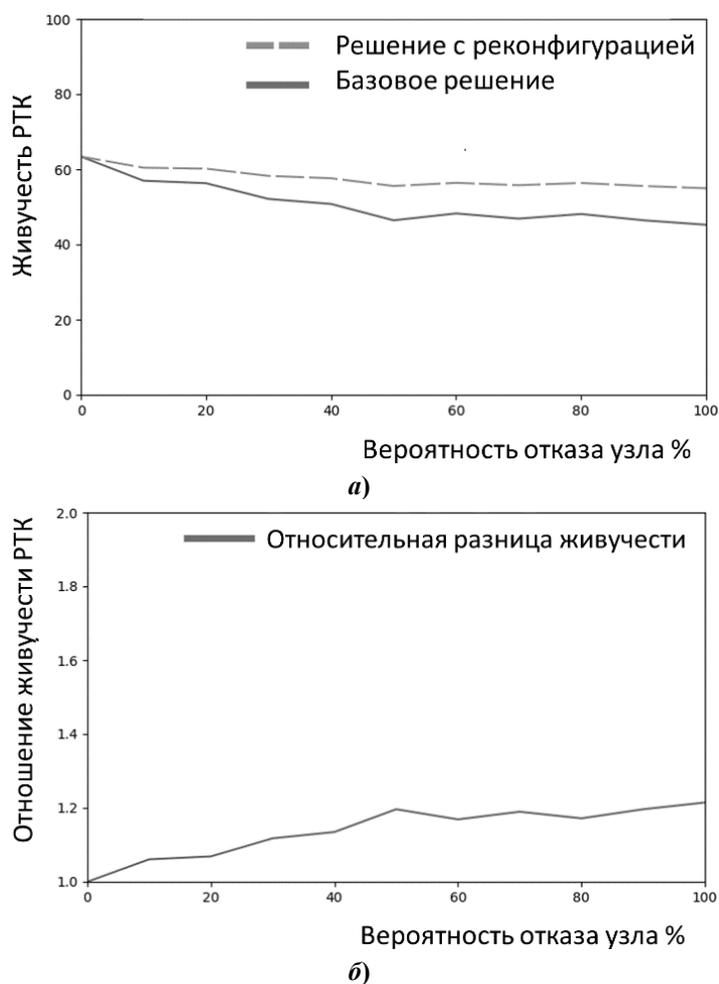


Рис. 2. Зависимость живучести РТК для сценария 1 с и без использования разработанного метода от вероятности отказа узла БВС (а), зависимость отношения живучести для сценария 1 с и без использования разработанного метода от вероятности отказа узла БВС (б)

Заключение

В результате разработан метод выбора рационального состава ФПО БВС РТК в экстремальных условиях. Предложен метод формирования многоверсионных библиотек функциональных программ БВС РТК и построение их паспортов. Рассмотрены аспекты предварительной фильтрации решений из многоверсионной библиотеки функциональных программ. Рассмотрено формирование математической модели решателя для выбора рационального состава ФПО БВС РТК.

Проведенные экспериментальные исследования с моделью обеспечения живучести БВС РТК на БВС, построенном на базе отечественных микропроцессоров «Эльбрус-2С3» и «Эльбрус-8С», показали, что в зависимости от сценариев применения живучесть может быть повышена более чем в 20 раз по отношению к решению без использования разработанного метода. Показано, что разница наиболее выражена при сценариях функционирования РТК

с изменчивыми приоритетами и высокой вероятностью отказа ВК из состава БВС РТК.

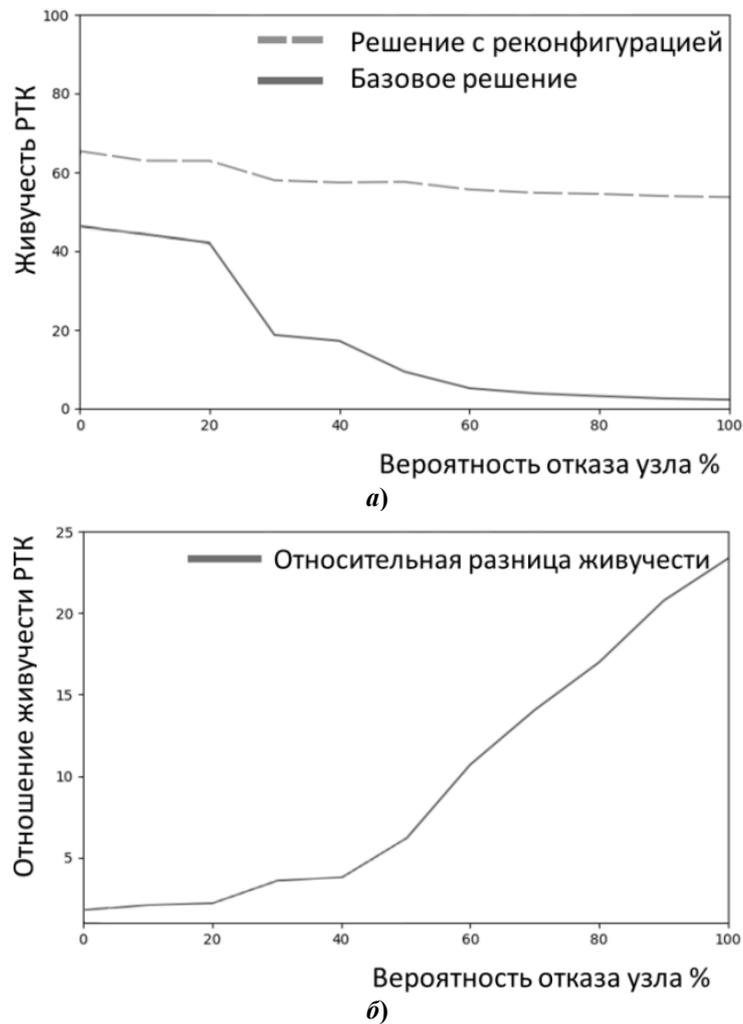


Рис. 3. Зависимость живучести РТК для сценария 2 с и без использования разработанного метода от вероятности отказа узла БВС (а), зависимость отношения живучести для сценария 2 с и без использования разработанного метода от вероятности отказа узла БВС (б)

Показано, что разработанный метод позволяет как синтезировать программы, оптимальные по выбранному критерию в зависимости от условий или архитектуры ВК, так и производить формирование рационального состава ФПО БВС РТК для обеспечения возможности реконфигурации в процессе функционирования.

Список литературы

1. Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Александров А. В., Славин О. А. Решение задач когнитивного управления группой роботов на многоядерных микропроцессорах «Эльбрус» // Современные информационные технологии и ИТ-образование : сб.

- науч. тр. II Междунар. науч. конф. и XII Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В. А. Сухомлина (Москва, 24–26 ноября 2017 г.). М., 2017. С. 232–244. EDN: IUMMTK
2. Романов А. М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. 2020. Т. 8, № 3 (35). С. 14–32. doi: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32 EDN: VOELFM
 3. Lei Deng, Song Han, Yuan Xie [et al.]. Model compression and hardware acceleration for neural networks: A comprehensive survey // Proceedings of the IEEE. 2020. Vol. 108, № 4. P. 485–532.
 4. Калюжный А. В., Гончаренко В. А., Соколовский А. Н. Проблемы повышения живучести робототехнических систем космического назначения на основе много-агентных технологий // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 1. С. 168–173. doi: 10.25586/RNU.V9187.20.01.P.168 EDN: FUGUSH
 5. Парамонов Н. Б., Минин И. В. Многоверсионное моделирование в ходе проектирования информационных систем // Межотраслевая информационная служба. 2014. № 1. С. 40–44.
 6. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ. М. : Высшая школа, 1989.
 7. Лаптев В. В., Морозов А. В. Экспертная система оценки качественных характеристик проектной модели программного обеспечения // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 8–11.
 8. Martello S. Knapsack problems: Algorithms and computer implementations. New York : J. Wiley & Sons, 1990.
 9. Кожин А. С. Основные проектные решения для процессора «Эльбрус-16С» // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S4. С. 74–75.
 10. Бычков И. Н., Лобанов И. Н., Молчанов И. А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для перспективных информационных систем // Приборы. 2018. № 8 (218). С. 14–20.
 11. Бочаров Н. А., Зуев А. Г., Славин О. А. Производительность микропроцессора Эльбрус-8СВ для решения задач технического зрения в условиях ограничений энергопотребления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 1 (218). С. 259–271. doi: 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271 EDN: PUHSYC

References

1. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Aleksandrov A.V., Slavin O.A. Solving problems of cognitive control of a group of robots on multi-core microprocessors “Elbrus”. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie: sb. nauch. tr. II Mezhdunar. nauch. konf. i XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / pod red. V.A. Sukhomlina (Moskva, 24–26 noyabrya 2017 g.) = Modern information technologies and IT education: proceedings of the 2nd International scientific conference and the 12th International scientific and practical conference / edited by V.A. Sukhomilin (Moscow, November 24–26, 2017)*. Moscow, 2017:232–244. (In Russ.). EDN: IUMMTK
2. Romanov A.M. Review of hardware and software for control systems of robots of various scales and purposes. Part 3. Extreme robotics. *Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal = Russian technology journal*. 2020;8(3):14–32. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32 EDN: VOELFM
3. Lei Deng, Song Han, Yuan Xie et al. Model compression and hardware acceleration for neural networks: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*. 2020;108(4):485–532.
4. Kalyuzhnyy A.V., Goncharenko V.A., Sokolovskiy A.N. Issues of increasing the survivability of robotic systems for space purposes based on multi-agent technologies.

- Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis and control.* 2020;(1):168–173. doi: 10.25586/RNU.V9187.20.01.P.168 EDN: FUGUSH
5. Paramonov N.B., Minin I.V. Multi-version modeling in the design of information systems. *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba = Inter-industry information service.* 2014;(1):40–44. (In Russ.)
 6. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Vvedenie v sistemnyy analiz = Introduction to Systems Analysis.* Moscow: Vysshaya shkola, 1989. (In Russ.)
 7. Laptev V.V., Morozov A.V. Expert system for assessing the qualitative characteristics of a software design model. *Informatsionnye tekhnologii = Information technology.* 2009;(3):8–11. (In Russ.)
 8. Martello S. *Knapsack problems: Algorithms and computer implementations.* New York: J. Wiley & Sons, 1990.
 9. Kozhin A.S. Main design solutions for the Elbrus-16S processor. *Nanoindustriya = Nanoindustry.* 2020;13(S4):74–75. (In Russ.)
 10. Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A. Computing technology based on the hardware and software platform “Elbrus” for advanced information systems. *Pribory = Devices.* 2018;(8):14–20. (In Russ.)
 11. Bocharov N.A., Zuev A.G., Slavin O.A. Elbrus-8SV microprocessor performance for solving machine vision problems under energy consumption limitations. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of South Federal University. Engineering sciences.* 2021;(1):259–271. (In Russ.). doi: 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271 EDN: PUHSYC

Информация об авторах / Information about the authors

Константин Александрович Суминов

начальник отдела 3.4.7, Институт
электронных управляющих машин
имени И. С. Брука (Россия, г. Москва,
ул. Вавилова, 24)

E-mail: konstantin.a.suminov@mcst.ru

Konstantin A. Suminov

Head of the department 3.4.7, Institute
of Electronic Control Machines named
after I.S. Bruk (24 Vavilova street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 12.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.02.2025

Принята к публикации / Accepted 24.02.2025

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 681.2.088

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-6

Исследование влияния параметров критических элементов и параметров Σ T-аналого-цифрового преобразователя на линейность функции преобразования

В. Н. Ашанин¹, А. А. Коротков²

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹ashanin58@yandex.ru, ²lexifer@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Многочисленные исследования показали, что одним из критических элементов малоразрядных интегрирующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) является конденсатор, входящий в состав интегратора, диэлектрическая абсорбция которого ограничивает предельно достижимую линейность функции преобразования. Актуальность исследования его влияния сегодня определяется в связи с разработкой многоразрядных интегрирующих аналого-цифровых преобразователей Σ -архитектуры, в которых осуществляется суммирование результатов преобразования примыкающих частных циклов за полный цикл. Выполнение операции суммирования частных и полного циклов преобразования приводит за счет их асинхронизма к возникновению методической составляющей погрешности от краевых эффектов, что ведет к неравенству интегральных значений преобразуемого и опорного напряжений за полный цикл преобразования. *Материалы и методы.* Эти вопросы исследованы на основе разработанного Σ T-АЦП с помощью имитационного моделирования в среде NI Multisim. Проведено экспериментальное исследование и получены значения среднеквадратического отклонения (СКО) линейности функции преобразования АЦП с применением идеального интегрирующего конденсатора, а также с добавлением в модель схемы замещения интегрирующего конденсатора с рядом значений коэффициента абсорбции. Дана оценка работоспособности алгоритма и проведен анализ влияния коэффициента абсорбции на итоговый результат преобразования при различных количествах частных тактов в полном цикле. *Результаты.* Исследованы погрешности линейности функции преобразования с учетом влияния диэлектрической абсорбции, достигнутой включением элементов схемы замещения интегрирующего конденсатора в модель преобразователя. Рассчитаны значения СКО линейности преобразования при различных количествах частных тактов в пол-

ном цикле преобразования. *Выводы.* Полученные значения СКО указывают на способность предложенного структурно-алгоритмического решения полностью устранить влияние инструментальной составляющей погрешности, вызванной явлениями диэлектрической абсорбции в интегрирующем конденсаторе. При всех значениях количества частных тактов преобразования в полном цикле абсорбционные явления не оказывают влияния на итоговый результат преобразования. При всех значениях коэффициента абсорбции среднеквадратичная погрешность линейности функции преобразования $\Sigma\text{T-АЦП}$ остается неизменной.

Ключевые слова: диэлектрическая абсорбция конденсатора, интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, Σ -архитектура, $\Sigma\text{T-АЦП}$, погрешность линейности

Для цитирования: Ашанин В. Н., Коротков А. А. Исследование влияния параметров критических элементов и параметров $\Sigma\text{T-аналого-цифрового}$ преобразователя на линейность функции преобразования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 67–74. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-6

Studying the influence of critical parameters and elements of the $\Sigma\text{T-аналого-цифрового}$ converter on the linearity of the conversion function

V.N. Ashanin¹, A.A. Korotkov²

¹Penza State University, Penza, Russia

²Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

¹ashanin58@yandex.ru, ²lexifer@mail.ru

Abstract. *Background.* Numerous studies have shown that one of the critical elements of low-bit integrating analog-to-digital converters (ADC) is a capacitor included in the integrator, the dielectric absorption of which limits the maximum achievable linearity of the conversion function. The relevance of studying its influence today is determined in connection with the development of multi-bit integrating analog-to-digital converters of the Σ -architecture, in which the summation of the conversion results of adjacent partial cycles is carried out for a full cycle. The execution of the operation of summation of partial and full conversion cycles leads to the emergence of a methodical component of the error from edge effects due to their asynchronism, which can lead to inequality of the integral values of the converted and reference voltages for a full conversion cycle. *Materials and methods.* These issues are investigated based on the developed $\Sigma\text{T-ADC}$ using simulation modeling in the NI Multisim environment. An experimental study was conducted and the values of the root mean square deviation (RMS) of the linearity of the ADC conversion function were obtained using an ideal integrating capacitor, as well as with the addition of an integrating capacitor equivalent circuit with a number of absorption coefficient values to the model. The algorithm performance was assessed and the effect of the absorption coefficient on the final conversion result was analyzed for different numbers of partial cycles in a full cycle. *Results.* The study of the linearity error of the conversion function was conducted taking into account the effect of dielectric absorption achieved by including elements of the equivalent circuit of the integrating capacitor in the converter model. The values of the RMS of the conversion linearity were calculated for different numbers of partial cycles in a full conversion cycle. *Conclusions.* The obtained RMS values indicate the ability of the proposed structural and algorithmic solution to completely eliminate the influence of the instrumental component of the error caused by dielectric absorption phenomena in the integrating capacitor. For all values of the number of partial conversion cycles in a full cycle, absorption phenomena do not affect the final conversion result. For all values of the absorp-

tion coefficient, the mean square error of the linearity of the $\Sigma\Delta$ -ADC conversion function remains unchanged.

Keywords: dielectric absorption of a capacitor, integrating analog-to-digital converter, Σ -architecture, $\Sigma\Delta$ -ADC, linearity error

For citation: Ashanin V.N., Korotkov A.A. Studying the influence of critical parameters and elements of the $\Sigma\Delta$ -analog-to-digital converter on the linearity of the conversion function. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):67–74. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-6

Введение

Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи (ИАЦП), обладая высокой помехоустойчивостью и точностью преобразования представляют широкий класс прецизионных преобразователей информации для решения различных инженерных задач [1, 2]. В них применяются различные виды промежуточной импульсной модуляции [3], обладающие определенными достоинствами и недостатками. В частности, в работах [4, 5], рассмотрена целесообразность применения в измерительных многоразрядных ИАЦП промежуточного преобразования в широтно-импульсный модулированный (ШИМ) сигнал, обеспечивающий независимость результата измерения в каждом полном цикле преобразования, получивших название $\Sigma\Delta$ -АЦП.

Любому измерительному аналого-цифровому преобразователю (АЦП) присущи инструментальная и методическая составляющие погрешности. Методы снижения методической составляющей в $\Sigma\Delta$ -АЦП описаны в работах [6, 7]. Важной составляющей инструментальной погрешности является абсорбция интегрирующего конденсатора, влияющая на линейность функции преобразования. В работе [3] проведено исследование ее влияния аналитическим способом и представлены алгоритмы и схемотехнические решения малоразрядных ИАЦП, в которых она теоретически отсутствует полностью. Полученные результаты обеспечивают возможность их использования в составе измерительных преобразователей напряжения в многоразрядный код. Один из перспективных предложенных технических решений $\Sigma\Delta$ -АЦП исследуем с помощью современных технологий компьютерного моделирования и оценим влияние абсорбции интегрирующего конденсатора и количества частных циклов в полном цикле на точность преобразования.

Разработка модели $\Sigma\Delta$ -аналого-цифрового преобразователя в среде NI Multisim

На основе разработанной функциональной схемы ИАЦП с промежуточным преобразованием напряжения в ШИМ-сигнал [6] (рис. 1) спроектирована компьютерная модель $\Sigma\Delta$ -АЦП (рис. 2) в программной среде Multisim. Данная среда дает возможность пользователю установить значения большинства параметров элементов модели, что позволяет реализовывать, по своей сути, виртуальный прототип. Это дает возможность манипулировать различными параметрами элементов и тем самым исследовать инструментальную погрешность измерительного преобразователя как от влияния параметров отдельного элемента, так и комплексно.

Используемый алгоритм промежуточного преобразователя напряжения в ШИМ-сигнал основан на равенстве средних (интегральных) значений пре-

образуемого и опорного напряжений за время частного такта преобразования [3], что обеспечивает нулевое значение интегрального значения напряжения на выходе интегратора за время частного цикла преобразования. Это теоретически исключает влияние диэлектрической абсорбции на результат преобразования за время частного такта [3, 7], однако за счет асинхронности начала и конца полного цикла преобразования с началом и концом первого и последнего из суммируемых результатов частных тактов возможно ненулевое интегральное значение напряжения на выходе интегратора за полный цикл преобразования.

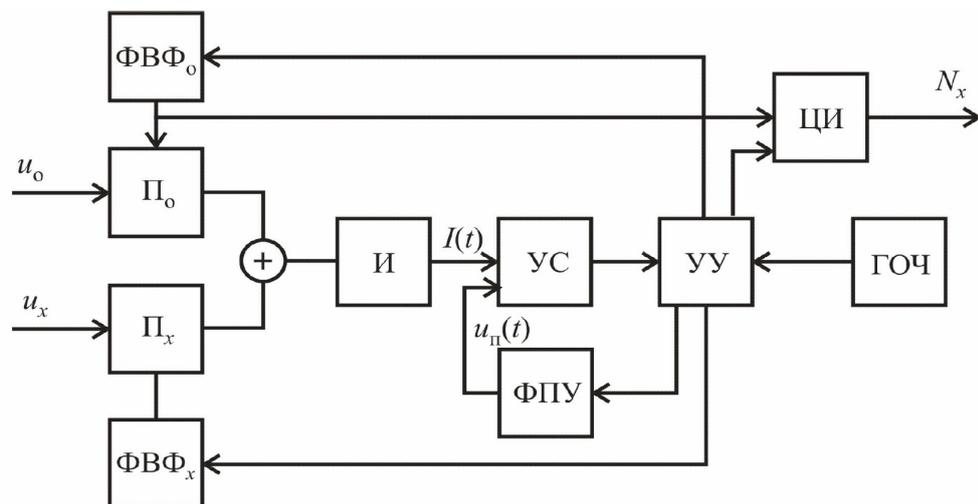


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема ИАЦП; ФВФ_x и ФВФ_o – формирователи весовых функций для входного u_x и для опорного u_o напряжений; П_x и П_o – умножители входного напряжения u_x на весовую функцию $g_x(t)$ и опорного напряжения U_o на весовую функцию $g_o(t)$; И – аналоговый интегратор; УС – устройство сравнения по уровню выходного напряжения интегратора с пороговым уровнем u_n , который формируется блоком ФПУ – формирователем порогового уровня; УУ – устройство управления для формирования полного и частных циклов преобразования; ЦИ – цифровой интегратор, предназначенный для подсчета импульсов цифрового эквивалента информативного сигнала; ГОЧ генерирует импульсы опорной частоты, которые используются для синхронизации выполняемых операций в ИАЦП и заполнения информативных интервалов времени выходного ШИМ-сигнала

Интегратор реализован по схеме Миллера [8, 9] с использованием элементов $R1, R2, C1$. Важную роль в модуляторе играет интегрирующий конденсатор $C1$, который накапливает заряд, пропорциональный входному сигналу в течение интервала интегрирования. Диэлектрическая абсорбция данного конденсатора является важным фактором, влияющим на точность и стабильность работы модулятора. Элементы $C2, R7, R8$ реализуют эквивалентную схему замещения диэлектрической абсорбции интегрирующего конденсатора $C1$ (рис. 3) [10, 11]. Значения этих элементов были рассчитаны в соответствии с имитируемым значением коэффициента абсорбции из ряда – 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1.

Абсорбция в диэлектрике интегрирующего конденсатора приводит к медленному восстановлению заряда конденсатора с постоянной времени,

определяемой C_a и R_a , что может вносить дополнительную погрешность в результаты преобразований при суммировании результатов частных циклов преобразования за полный цикл.

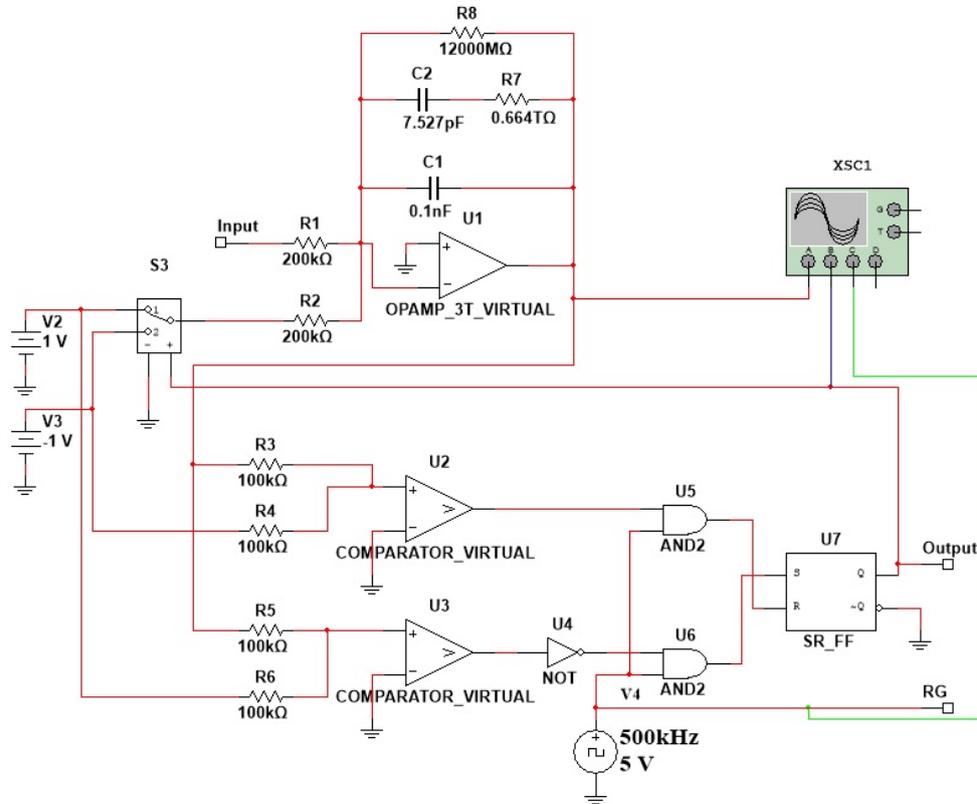


Рис. 2. Модель широтно-импульсного модулятора

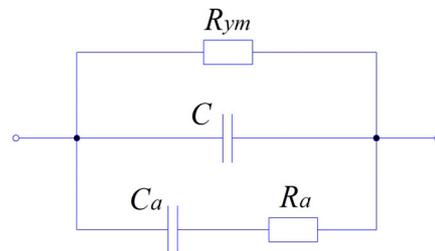


Рис. 3. Схема замещения интегрирующего конденсатора:
 C – емкость идеализированного конденсатора; C_a и R_a – емкость и сопротивление абсорбции; R_{yt} – сопротивление утечек

Для минимизации влияния явлений диэлектрической абсорбции в интегрирующих конденсаторах на итоговый результат преобразования при проектировании различных вариантов АЦП используются следующие методы:

- выбор конденсаторов, содержащих диэлектрические материалы с низкой абсорбцией (полистирол, полипропилен);
- использование малых напряжений заряда/разряда конденсатора;
- применение малогабаритных конденсаторов;

- использование схемных методов компенсации абсорбционных токов;
- термостатирование интегрирующего конденсатора;
- применение специальных методов калибровки АЦП для учета диэлектрической абсорбции.

Отметим, что низким уровнем диэлектрических потерь, высокой стабильностью и низким температурным коэффициентом емкости, что важно для обеспечения высокой точности интегрирования, обладают пленочные конденсаторы, среди которых выделяются:

- полипропиленовые конденсаторы;
- полиэтилентерефталатные конденсаторы;
- полистирольные конденсаторы.

Выбор конкретного типа конденсатора зависит от требований к точности, стабильности, температурному диапазону работы и другим параметрам, предъявляемым к интегрирующему АЦП.

Исследование влияния диэлектрической абсорбции интегрирующего конденсатора

Проведено экспериментальное исследование, в ходе которого получены значения среднеквадратического отклонения (СКО) линейности функции преобразования АЦП в единицах младшего разряда без учета диэлектрической абсорбции интегрирующего конденсатора, а также с добавлением в модель схемы замещения интегрирующего конденсатора с рядом значений коэффициента абсорбции – 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1. Для определения значения СКО линейности ΣT -АЦП были выполнены с помощью логического анализатора измерения показаний выходного кода в заданном диапазоне входного напряжения (минус 1...плюс 1) В с шагом 0,05 В при различных значениях количества частных тактов в полном цикле.

Полученные значения в единицах младшего значащего разряда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения СКО

Коэффициент абсорбции интегрирующего конденсатора	Количество частных тактов модуляции в полном цикле преобразования		
	10	100	1000
	Среднеквадратичная погрешность ΣT -АЦП		
0	2,0311	0,4016	0,1304
0,01	2,0311	0,4016	0,1304
0,03	2,0311	0,4016	0,1304
0,05	2,0311	0,4016	0,1304
0,07	2,0311	0,4016	0,1304
0,1	2,0311	0,4016	0,1304

Реализуемая модель не содержит подсистему коррекции погрешности от краевых эффектов [3] и данная составляющая погрешности с полным весом входит в результат преобразования, что видно из сопоставления результатов преобразования среднеквадратической погрешности при различных значениях количества частных циклов в полном цикле. При использовании предлагаемых методов коррекции этой составляющей погрешности [5, 6] по-

грешность преобразования не зависит от количества частных тактов и ограничивается значением единицы младшего разряда.

Заключение

Приведенные значения СКО указывают на способность данного структурно-алгоритмического решения полностью устранить влияние инструментальной составляющей погрешности, вызванной диэлектрической абсорбцией в интегрирующем конденсаторе. При всех трех установках количества частных тактов преобразования в полном цикле абсорбционные явления не оказывают воздействия на итоговый результат преобразования. При всех значениях коэффициента абсорбции среднеквадратичная погрешность линейности $\Sigma\Delta$ -АЦП остается неизменной и определяется только количеством частных тактов за полный цикл преобразования. Как показали экспериментальные исследования $\Sigma\Delta$ -АЦП, для обеспечения погрешности измерения менее одного младшего значащего разряда необходимо произвести суммирование около 50 частных тактов за полный цикл преобразования.

Список литературы

1. Ашанин В. Н. Analysis and Synthesis Theoretical Problems of the Measurement on Heterogeneous Structure // Датчики и системы. 2011. № 7. С. 2–7.
2. Ашанин В. Н., Коротков А. А., Чувькин Б. В., Сидорова И. А. Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации $\Sigma\Delta$ -архитектуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 26–35.
3. Ашанин В. Н., Чувькин Б. В., Шахов Э. К. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : монография. Пенза : ИИЦ ПГУ, 2009. 214 с.
4. Шахов Э. К., Ашанин В. Н., Надеев А. И. Реализация концепций $\Sigma\Delta$ -АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2006. № 6. С. 226–236.
5. Ashanin V. N., Korotkov A. A. Development of Sigma-T ADC with Analogue Compensation of Error Caused by Edge Effects // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017). 2017. P. 7998567.
6. Ашанин В. Н. Структурно-алгоритмические методы компенсации погрешности от краевых эффектов в интегрирующих АЦП // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 4. С. 82–92.
7. Шахов Э. К., Михотин В. Д. Интегрирующие развертывающие преобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
8. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 396 с.
9. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
10. Берзан В. П., Геликман Б. Ю., Гураевский М. Н. [и др.]. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. М. : Энергоатомиздат, 1987. 656 с.
11. Горячева Г. А., Добромислов Е. Р. Конденсаторы : справочник. М. : Радио и связь, 1984. 88 с.

References

1. Ashanin V.N. Analysis and Synthesis Theoretical Problems of the Measurement on Heterogeneous Structure. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2011;(7):2–7. (In Russ.)
2. Ashanin V.N., Korotkov A.A., Chuvykin B.V., Sidorova I.A. Analysis of the state and production trends of integral transformers of information technologies $\Sigma\Delta$ -

- architectural. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2014;(1):26–35. (In Russ.)
3. Ashanin V.N., Chuvykin B.V., Shakhov E.K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monografiya = Theory of integrating analog-to-digital conversion: monograph.* Penza: IITs PGU, 2009:214. (In Russ.)
 4. Shakhov E.K., Ashanin V.N., Nadeev A.I. Implementation of the concept of $\Sigma\Delta$ -ADC in integrated ADC with other types of pulsed modulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region = University proceedings. Volga region.* 2006;(6):226–236. (In Russ.)
 5. Ashanin V.N., Korotkov A.A. Development of Sigma-T ADC with Analogue Compensation of Error Caused by Edge Effects. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017).* 2017:7998567.
 6. Ashanin V.N. Structural-algorithmic methods of error compensation from edge effects in integrating ADCs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2009;(4):82–92. (In Russ.)
 7. Shakhov E.K., Mikhotin V.D. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli = Integrating deploying converters.* Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
 8. Martyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya = Electrical parameter converters for control and measurement systems.* Moscow: Energiya, 1976:396. (In Russ.)
 9. Gutnikov V.S. *Integral'naya elektronika v izmeritel'nykh ustroystvakh = Integrated electronics in measuring devices.* Leningrad: Energoatomizdat, 1988:304. (In Russ.)
 10. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskiy M.N. et al. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki = Electric capacitors and capacitor units.* Moscow: Energoatomizdat, 1987:656. (In Russ.)
 11. Goryacheva G.A., Dobromyslov E.R. *Kondensatory: spravochnik = Capacitors: reference.* Moscow: Radio i svyaz', 1984:88. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Василий Николаевич Ашанин

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроэнергетики
и электротехники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ashanin58@yandex.ru

Vasily N. Ashanin

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of electric power engineering and electrical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Александрович Коротков

кандидат технических наук,
инженер конструктор 2-й категории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, у. Каракозова, 44)

E-mail: lexifer@mail.ru

Aleksey A. Korotkov

Candidate of engineering sciences,
design engineer of the 2nd category,
Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices (44 Karakozova
street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 06.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.02.2025

Принята к публикации / Accepted 02.03.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.9

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-7

Обработка виброизмерительной информации при автоматизации распознавания катастрофического износа резца по запасу устойчивости динамической системы

А. А. Игнатьев¹, В. А. Добряков², В. А. Ревякин³

^{1,2,3}Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

¹atp@sstu.ru, ³tmm@sstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из доминирующих факторов, влияющих на макро- и микрогеометрические параметры точности деталей, является динамическое качество автоматизированных металлорежущих станков (АМС). Оно оценивается по результатам измерения виброакустических колебаний динамической системы (ДС) станков, которые далее обрабатываются различными методами. Динамическое качество может изменяться для станков одной модели в зависимости от их технического состояния, а также для каждого станка в зависимости от назначенного режима резания, износа резца и других факторов. Исследования, выполненные в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю. А., показали, что оценку динамического качества АМС целесообразно выполнять по запасу устойчивости ДС, определяемому в результате специальной обработки виброизмерительной информации и идентификации автокорреляционной функции (АКФ) колебаний ДС. Целью работы является алгоритмизация процесса обработки виброизмерительной информации при формировании оценок динамического качества станка по запасу устойчивости динамической системы для выявления начальной фазы катастрофического износа резца. Для достижения цели, во-первых, проводится теоретическое обоснование вида АКФ колебаний при резании, что используется затем для идентификации АКФ по экспериментальным данным; во-вторых, предлагается методика и алгоритм обработки виброизмерительной информации; в-третьих, выполняется практическая апробация метода распознавания начала катастрофического износа резца на токарном станке с числовым программным управлением. *Материалы и методы.* Можно выделить два основных направления анализа и оценки динамического качества станков, причем первое базируется на теоретических моделях, в которых в определенной степени используются результаты экспериментов, а второе – на экспериментальных исследованиях колебаний различных узлов АМС с дальнейшей математической обработкой измерительной информации для идентификации модели ДС и формирования оценок динамического качества. Результаты многолетних исследований токарных и шлифовальных станков показали, что в производственных условиях именно второе направление позволяет оперативно оценивать динамическое качество АМС при условии компьютерной обработки измерительной информации. *Результаты и выводы.* Ре-

зультаты теоретического анализа стохастических колебаний в динамической системе станка и экспериментальных исследований точности обработки колец подшипников на токарном станке с числовым программным управлением с одновременным автоматизированным измерением виброакустических колебаний и вычислением показателей колебательности динамической системы подтвердили их корреляционную связь и возможность определения критерия для выявления начальной фазы катастрофического износа резца по существенному изменению (более чем на 50 %) первых разностей показателей колебательности.

Ключевые слова: станки, динамическое качество, виброакустические колебания, автокорреляционная функция, спектральная плотность, запас устойчивости, интегральные оценки, качество обработки

Для цитирования: Игнат'ев А. А., Добряков В. А., Ревякин В. А. Обработка виброизмерительной информации при автоматизации распознавания катастрофического износа резца по запасу устойчивости динамической системы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 75–91. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-7

Vibration measurement information processing when automating recognition catastrophic cutter wear by dynamic system stability margin

A.A. Ignat'ev¹, V.A. Dobryakov², V.A. Revyakin³

^{1,2,3}Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

¹atp@sstu.ru, ³tmm@sstu.ru

Abstract. Background. One of the dominant factors affecting the macro- and microgeometric accuracy parameters of parts is the dynamic quality of automated metal-cutting machines. It is evaluated based on the results of measuring vibroacoustic vibrations of the dynamic system (DS) of machines, which are then processed by various methods. Dynamic quality can vary for machines of the same model depending on their technical condition, as well as for each machine depending on the assigned cutting mode, cutter wear and other factors. Studies performed at the Yuri Gagarin State Technical University showed that it is advisable to assess the dynamic quality of the machines by the DS stability margin determined as a result of special processing of vibration measurement information and identification of the DS oscillation autocorrelation function (ACF). The purpose of the work is to algorithmize the process of processing vibration measuring information when generating estimates of the dynamic quality of the machine by the stability margin of the dynamic system in order to identify the initial phase of catastrophic wear of the cutter. To achieve the goal, firstly, a theoretical justification of the type of ACF vibrations during cutting is carried out, which is then used to identify ACF from experimental data, secondly, a method and algorithm for processing vibration measuring information is proposed, and thirdly, a practical test of the method for recognizing the beginning of catastrophic wear of a cutter on a CNC lathe is carried out. *Materials and methods.* Two main areas of analysis and evaluation of the dynamic quality of machines can be distinguished, the first being based on theoretical models, in which the results of experiments are used to a certain extent, and the second - on experimental studies of vibrations of various machines nodes with further mathematical processing of measurement information to identify the DS model and form estimates of dynamic quality. The results of many years of research of turning and grinding machines have shown that in production conditions it is the second direction that allows you to quickly assess the dynamic quality of the machines, subject to computer processing of measuring information. *Results and conclusions.* The results of theoretical analysis of

stochastic oscillations in the dynamic system of the machine and experimental studies of the accuracy of machining bearing rings on a CNC lathe with simultaneous automated measurement of vibroacoustic oscillations and calculation of oscillation indicators of the dynamic system confirmed their correlation and the possibility of determining the criterion for detecting the initial phase of catastrophic wear of the cutter by a significant change (by more than 50%) of the first differences in oscillation indicators.

Keywords: machines, dynamic quality, vibroacoustic vibrations, autocorrelation function, spectral density, stability margin, integral estimates, processing quality

For citation: Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. Vibration measurement information processing when automating recognition catastrophic cutter wear by dynamic system stability margin. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):75–91. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-7

Введение

При прецизионной обработке деталей для изделий машино- и приборостроения одним из доминирующих факторов, влияющих на макро- и микрогеометрические параметры точности деталей, является динамическое качество автоматизированных металлорежущих станков (АМС) [1–5]. Оно оценивается по результатам измерения виброакустических колебаний (ВА) динамической системы (ДС) станков, которые далее обрабатываются различными методами [6–9]. При заключительном проходе резцом формируются заданные параметры точности (размер, волнистость, шероховатость) обработанной поверхности, что вызывает необходимость минимизации ВА колебаний в паре «резец – деталь». Динамическое качество может изменяться для станков одной модели в зависимости от их технического состояния, а также для каждого станка в зависимости от назначенного режима резания, износа резца и других факторов. Исследования, выполненные в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю. А., показали, что оценку динамического качества АМС целесообразно выполнять по запасу устойчивости ДС, определяемому в результате специальной обработки виброизмерительной информации и идентификации автокорреляционной функции (АКФ) колебаний ДС [5, 10]. Важным в рассматриваемом случае является метод обработки измерительной информации, решающий задачу оперативного контроля динамического качества станков при решении следующих задач:

1) выбор режима резания, при котором качество обработанной поверхности наиболее высокое, в том числе при изменении материалов заготовки и инструмента;

2) определение момента наступления катастрофического износа резца для его своевременной замены;

3) сравнение станков одной модели по динамическому качеству и выявление имеющих низкие значения для реализации гибкого технического обслуживания.

Практическое решение первой задачи на станках различных моделей подробно рассмотрено в ранее опубликованных работах [11, 12].

Целью данной работы является алгоритмизация процесса обработки виброизмерительной информации при формировании оценок динамического качества станка по запасу устойчивости динамической системы для выявления начальной фазы катастрофического износа резца.

Для достижения цели, во-первых, проводится теоретическое обоснование вида АКФ колебаний при резании, что используется затем для идентификации АКФ по экспериментальным данным; во-вторых, предлагается методика и алгоритм обработки виброизмерительной информации; в-третьих, выполняется практическая апробация метода распознавания начала катастрофического износа резца на токарном станке с числовым программным управлением (ЧПУ).

Методическое обеспечение для формирования оценок динамического качества станков на основе обработки информации о колебаниях динамической системы

Можно выделить два основных направления анализа и оценки динамического качества станков, причем первое базируется на теоретических моделях, в которых в определенной степени используются результаты экспериментов, а второе – на экспериментальных исследованиях колебаний различных узлов АМС с дальнейшей математической обработкой измерительной информации для идентификации модели ДС и формирования оценок динамического качества [5, 13]. С практической точки зрения второе направление более адекватно позволяет оценить реальное динамическое качество станка.

Идентификация ДС также имеет два основных направления. Первое основывается на создании аналитических моделей достаточно высокой размерности и их уточнении по результатам экспериментов с использованием, например, модального анализа; второе – на экспериментальных методах, связанных с формированием на входе ДС сигналов определенной формы и обработкой выходных сигналов по специальным методикам [6]. Результаты многолетних исследований токарных и шлифовальных станков, как указано выше, показали, что в производственных условиях именно второе направление позволяет оперативно оценивать динамическое качество АМС при условии компьютерной обработки измерительной информации [5, 9].

На рис. 1 представлена методика формирования оценок динамического качества станков, которая базируется на построении теоретических моделей колебательных процессов в ДС, необходимых для выявления их особенностей в данном станке и последующей идентификации по экспериментальным данным, а также на экспериментальных исследованиях точности обработки и ее взаимосвязи с колебаниями и на их обработке различными методами для выбора информативных параметров. Следует отметить, что для оценки динамического качества АМС могут использоваться отдельные частоты спектра колебаний ДС [6, 14], интегральные оценки спектральной плотности мощности (СПМ) и интегральные оценки АКФ [15, 16], а также показатель колебательности ДС и коэффициент затухания АКФ [5]. Вычисление двух последних информативных параметров предпочтительно с точки зрения автоматизации обработки измерительной информации.

Для практической реализации автоматизированного распознавания катастрофического износа резца необходимо пройти следующие этапы:

1. Обосновать изменение динамического качества станка на основе оценки запаса устойчивости ДС по мере износа инструмента. Указанное отражено ранее в работах [11, 17] на основе построения модели ДС, учитывающей износ резца.

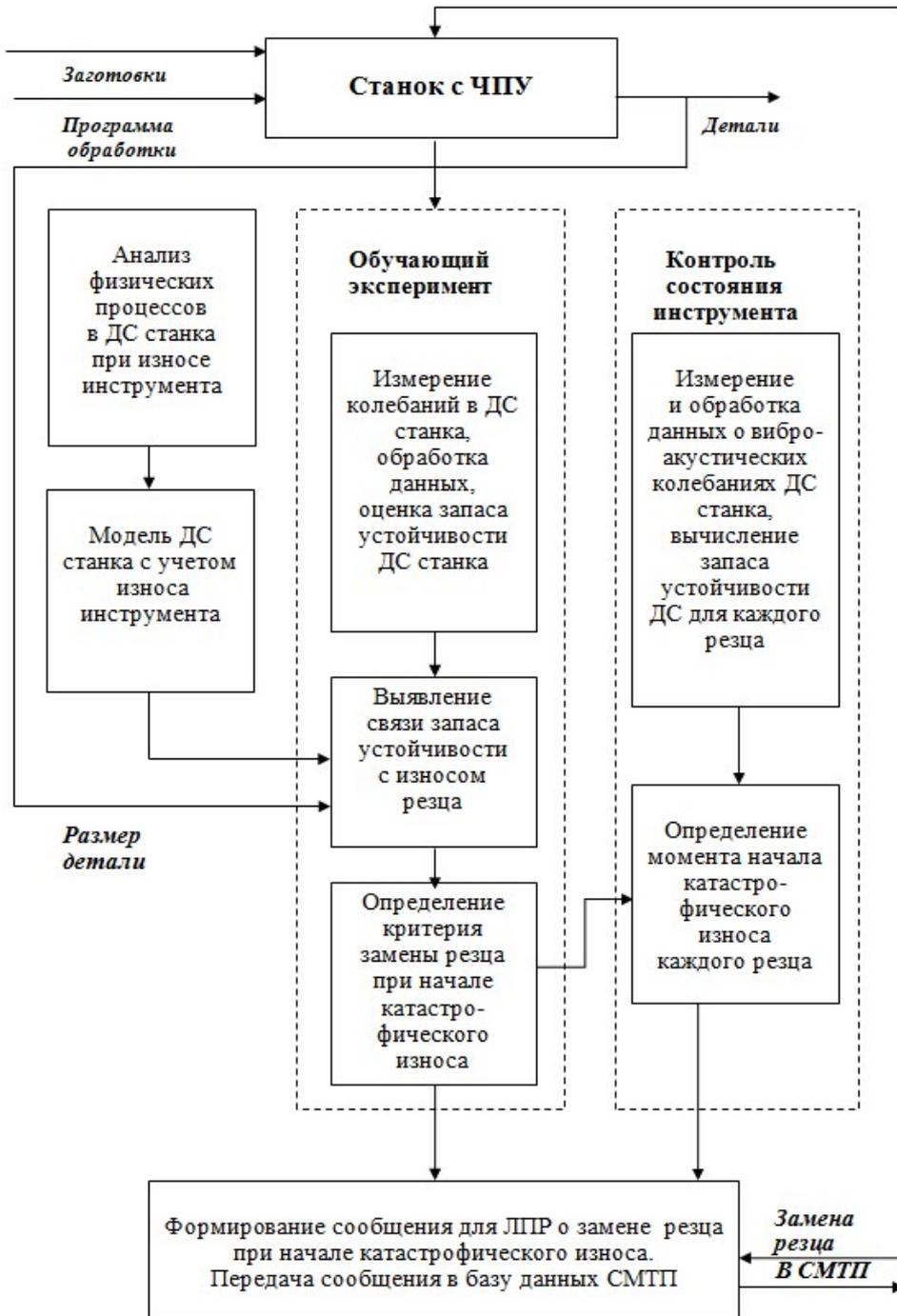


Рис. 1. Алгоритмизация выявления начала катастрофического износа резца по запасу устойчивости на основе обработки измерительной информации о колебаниях динамической системы

2. Выявить связь износа резца с изменением запаса устойчивости ДС на основе измерения колебаний и их последующей обработки для обоснования критерия начала катастрофического износа инструмента. Это реализуется

в рамках обучающего эксперимента с передачей результатов в экспертную систему.

3. Апробировать методику распознавания начальной фазы катастрофического износа резца в производственных условиях на основе использования результатов обучающего эксперимента с передачей результатов по стойкости различных резцов в базу данных системы мониторинга технологического процесса (СМТП). Решение о необходимости замены резца формируется либо автоматически в экспертной системе, либо лицом, принимающим решение (ЛПР).

Наиболее высокое динамическое качество АМС соответствует максимуму запаса устойчивости, который можно оценить, во-первых, по критерию Михайлова, в котором запас устойчивости равен минимальному расстоянию от кривой Михайлова до начала координат; во-вторых, по показателю колебательности ДС, вычисляемому из ее передаточной функции, идентифицированной по АКФ колебаний [5, 10]; во-третьих, по коэффициенту затухания АКФ [17]. Важной в данном случае является автоматизация обработки измерительной информации, решающая задачу оперативного контроля динамического качества станков. С этой точки зрения в производственных условиях достаточно просто вычисляется показатель колебательности ДС. Результаты измерений по каждому станку накапливаются в экспертной системе и передаются в СМТП.

На втором этапе в процессе обучающего эксперимента при реализации методики формирования оценок динамического качества АМС первоначально определяется передаточная функция ДС $W(p)$, а затем показатель колебательности, изменение которого дает представление о снижении запаса устойчивости ДС при износе режущего инструмента.

При определении передаточной функции $W(p)$ предполагается, что входным сигналом для динамической системы, возбуждающим в ней колебания, является сила резания, представляющая собой стохастический сигнал $\xi(t)$ типа ограниченный «белый шум» с АКФ $K_{\xi\xi}(\tau)$ [2, 18]. В этом случае для вычисления $W(p)$ используется формула, полученная в работе [19]:

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W(p) \cdot W(-p), \quad (1)$$

где $K_{yy}(p)$ – изображение по Лапласу АКФ выходного сигнала $K_{yy}(\tau)$.

В качестве выходного сигнала рассматриваются регистрируемые колебания ДС при резании.

Показатель колебательности ДС вычисляется по формуле

$$M = \frac{A_{\max}(\omega)}{A(0)}, \quad (2)$$

где $A_{\max}(\omega)$ – максимальное значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) динамической системы; $A(0)$ – значение АЧХ при $\omega = 0$.

Для расчета АЧХ $A(\omega)$ используется известная формула [20]:

$$A(\omega) = \sqrt{(W(j\omega))^2}, \quad (3)$$

где $W(j\omega)$ – частотная функция, полученная из передаточной функции $W(p)$ заменой $p = j\omega$.

При этом считается, что запас устойчивости максимален для значений показателя колебательности $M = 1,1, \dots, 1,5$, а с ростом величины M запас устойчивости снижается.

Далее следует получить математическую модель АКФ выходного сигнала, которая необходима для ее идентификации по данным экспериментальных измерений колебаний при точении и определении в дальнейшем тенденции изменения показателя колебательности ДС при износе резца.

Математическая модель автокорреляционной функции виброакустических колебаний динамической системы станка

Для получения математической модели АКФ колебаний, зарегистрированных на резцовом блоке токарного станка, необходимо выполнить анализ колебаний в паре «резец – деталь» при изложенном выше условии, что возбуждающая ДС сила резания имеет стохастический характер. Дифференциальное уравнение колебаний в паре «резец – деталь» в правой части содержит стохастическую компоненту $F_{\xi}(t)$:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + H \frac{dy}{dt} + Cy = F_{\xi}(t), \quad (4)$$

где M, H, C – приведенные к резцу массы, коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы станка [2]; $F_{\xi}(t)$ – сила резания, действующая на систему; $y(t)$ – регистрируемые колебания резцового блока.

Введем обозначения:

$$g = \frac{H}{2M}, \quad \omega_0^2 = \frac{C}{M}, \quad \xi(t) = \frac{F_{\xi}(t)}{M}, \quad (5)$$

тогда уравнение (4) примет вид

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2g \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = \xi(t), \quad (6)$$

где g – показатель демпфирования; ω_0 – частота собственных колебаний.

Стохастический характер правой части уравнения не позволяет в явном виде решить уравнение (6) относительно регистрируемой величины $y(t)$ из-за стохастической компоненты в правой части уравнения. В этом случае можно воспользоваться результатами работ [21, 22], привести уравнение (6) к виду

$$\left(\frac{d^2}{d\tau^2} + 2g \frac{d}{d\tau} + \omega_0^2 \right) K_{yy}(\tau) = K_{\xi\xi}(\tau), \quad (7)$$

где $K_{\xi\xi}(\tau)$ и $K_{yy}(\tau)$ – автокорреляционные функции входного и выходного сигналов соответственно.

Из уравнения (7) следует, что АКФ $K_{yy}(\tau)$ адекватно отражает регистрируемый колебательный процесс в паре «резец – деталь». Решение уравнения (7) относительно $K_{yy}(\tau)$ ранее было получено в работе [9], но объем вычислений значителен. В работе [23] был получен теоретически общий вид АКФ с применением теории вычетов при вычислениях интегралов от комплексных функций, но объем расчетов также значителен, поэтому предлагается более простой метод вычисления АКФ $K_{yy}(\tau)$, основы которого изложены в работе [24].

При условии, что ДС является линейной узкополосной системой, АКФ регистрируемого сигнала вычисляется по формуле [24]:

$$K_{yy}(\tau) = \left[\frac{S_0}{\pi} \int_0^{\infty} A^2(\Omega) \cos \Omega \tau d\Omega \right] \cos \omega_0 \tau, \quad (8)$$

где $\Omega = \omega - \omega_0$.

Динамическая система реально является узкополосной, что показано в работе [9] для токарного станка с ЧПУ модели ПАБ-350.

Передачная функция ДС, адекватно отражающая динамические свойства системы по уравнению (4), соответствует колебательному звену

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\alpha T p + 1}, \quad (9)$$

где $T = 1/\omega_0$; K – коэффициент передачи; α – коэффициент затухания.

Из формулы (9) можно получить выражение для квадрата АЧХ динамической системы:

$$A^2(\omega) = \frac{K^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\alpha^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (10)$$

Далее формулу (10) приведем к виду

$$A^2(\omega) = \frac{K^2}{\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\alpha^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (11)$$

Так как $A(\omega)$ колебательного звена имеет явно выраженную область резонанса, то получаем

$$A^2(\Omega) = \frac{K^2}{\left(\frac{2\Omega}{\omega_0}\right)^2 + 4\alpha^2} = \frac{K^2 \omega_0^2}{4(\Omega^2 + \alpha^2)}, \quad (12)$$

где $\omega_0 \gg \Delta_c$, Δ_c – полоса пропускания системы.

В этом случае из формулы (8) следует

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0 K^2 \omega_0^2}{4\pi} \left[\int_0^{\infty} \frac{\cos \Omega \tau}{\Omega^2 + \alpha^2} d\Omega \right] \cos \omega_0 \tau = \frac{S_0 K^2 \omega_0^2 \pi}{4\pi 2\alpha} e^{-\alpha \tau} \cos \omega_0 \tau. \quad (13)$$

Вычисление интеграла дает окончательное выражение для АКФ:

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0 K^2 \omega_0^2}{8\alpha} e^{-\alpha \tau} \cos \omega_0 \tau. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что АКФ выходного сигнала представляет собой затухающую косинусоиду. Это согласуется с формулой, полученной в работе [23], но значительно проще с точки зрения математических преобразований. Формула (14) используется для идентификации экспериментальной АКФ колебаний, применяемой далее в соответствии с изложенной методикой для оценки запаса устойчивости динамической системы.

Алгоритмизация распознавания начальной фазы катастрофического износа резца по изменению запаса устойчивости динамической системы

Обучающий эксперимент направлен на формирование критерия замены резца при наступлении начальной фазы его катастрофического износа. В ходе эксперимента осуществляется измерение колебаний резцового блока станка в диапазоне до 4 кГц при обработке конкретным резцом. Измерения выполняются с помощью виброизмерителя ВШВ-003М3, датчик которого устанавливается на резцовый блок станка. Затем данные виброизмерений обрабатываются компьютером с помощью специального программного-математического обеспечения [25], которое позволяет последовательно получить автокорреляционную функцию виброакустических колебаний $K_{yy}(\tau)$, передаточную функцию при резании $W(p)$, амплитудно-частотную характеристику ДС, а затем из нее вычислить показатель колебательности M , по которому оценивается запас устойчивости.

Для выявления связи запаса устойчивости ДС с износом резца осуществляется последовательная обработка деталей и контролируется их характерный размер, изменяющийся по мере износа резца, а также вычисляется запас устойчивости.

Как известно, износ резца при наступлении катастрофического износа резко увеличивается и, следовательно, изменяются размеры деталей. Кроме того, в это же время растет амплитуда виброакустических колебаний, что определяет снижение запаса устойчивости. Следовательно, резкое изменение запаса устойчивости может служить критерием замены инструмента и формирования соответствующего сообщения для ЛПР.

В производственных условиях проводятся аналогичные измерения колебаний резцового блока станка с вычислением запаса устойчивости ДС. При существенном снижении запаса устойчивости, как это установлено в обучающем эксперименте, формируется сообщение о начале катастрофического износа режущего инструмента и необходимости его замены. Аналогичные данные получают для каждого из резцов.

Сведения о количестве обработанных деталей конкретным резцом заносятся в базу данных СМТП. Это позволяет накапливать информацию о реальной стойкости инструмента и получать статистические данные о разбросе стойкости каждого из резцов.

Реальные значения запаса устойчивости в условных единицах можно получить, как указано выше, из измеренных колебаний резцового блока путем идентификации передаточной функции ДС. Исходя из полученных экспериментально-аналитическим путем запасов устойчивости для последовательно обработанных деталей можно выявить тенденцию их изменения при наступлении катастрофического износа резца и, соответственно, установить критерий выявления его начальной фазы.

Методика обработки виброизмерительной информации для экспериментально-аналитического определения запаса устойчивости и начала катастрофического износа резца отражена на рис. 2.

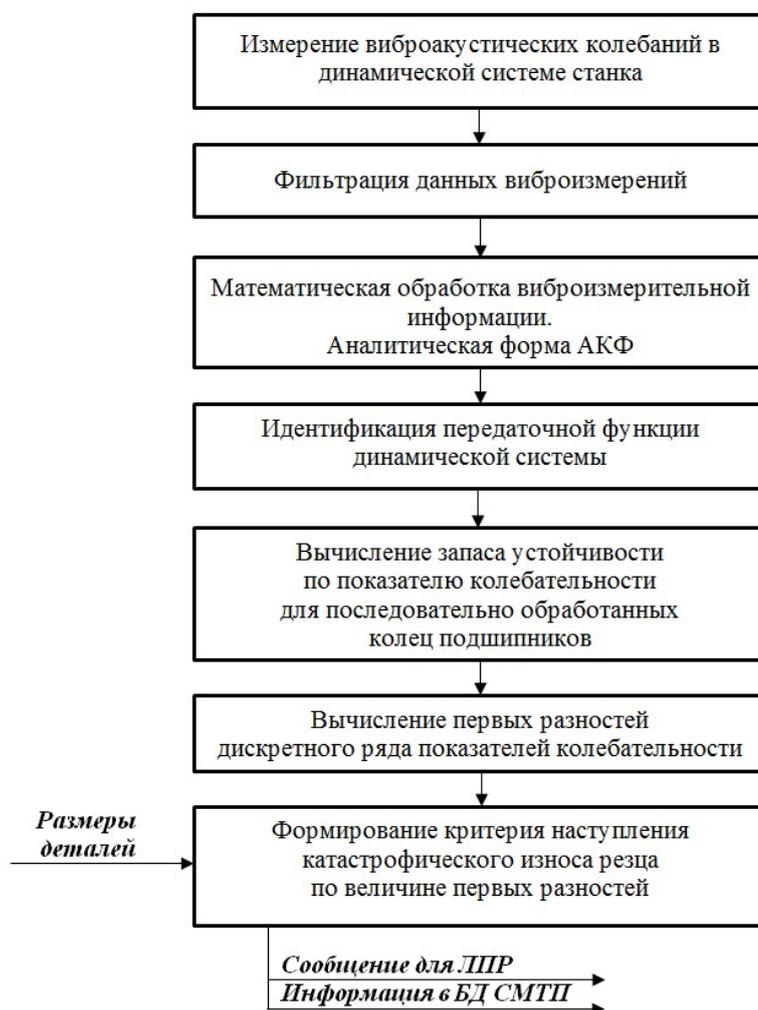


Рис. 2. Последовательность обработки виброизмерительной информации при экспериментально-аналитической оценке запаса устойчивости динамической системы для выявления начальной фазы катастрофического износа инструмента

Методика обработки данных виброизмерений состоит из нескольких этапов:

- 1) измерение виброакустических колебаний на резцовом блоке станка;
- 2) ввод данных виброизмерений в компьютер и их фильтрация для исключения влияния низкочастотных составляющих, связанных с вибрациями механических элементов станка;
- 3) вычисление АКФ и ее аппроксимация формулой (14);
- 4) идентификация передаточной функции по формуле (1);
- 5) расчет из передаточной функции АЧХ по формуле (3) и вычисление показателей колебательности ДС по формуле (2) для последовательно обработанных деталей с формированием дискретного ряда значений;
- 6) вычисление первых разностей сформированного дискретного ряда значений показателей колебательности;
- 7) формирование критерия наступления катастрофического износа резца по установленной величине первых разностей значений показателей колебательности при сравнении с изменением размеров деталей (критерий основан на существенном изменении значений первых разностей, например на 100 %, устанавливается в результате обучающего эксперимента).

При выявлении катастрофического износа резца компьютер формирует сообщение о необходимости замены инструмента для наладчика, а также передает его в базу данных СМТП для накопления статистических данных о стойкости каждого резца.

Таким образом, реализация методики в производственных условиях позволяет выявить начало катастрофического износа каждого резца, участвующего в обработке данной детали.

На рис. 3 представлена точностная диаграмма обработки колец подшипников из стали ШХ-15 на токарном станке с ЧПУ модели ПАБ-350, которая отражает снижение диаметрального размера дорожки качения по мере износа резца. При приближении размера к нижнему полю допуска на 31-й детали наладчиком введена коррекция на размер и обработка продолжилась. Начиная с 43-го кольца отмечено резкое снижение диаметрального размера, что отражает наступление катастрофического износа резца.

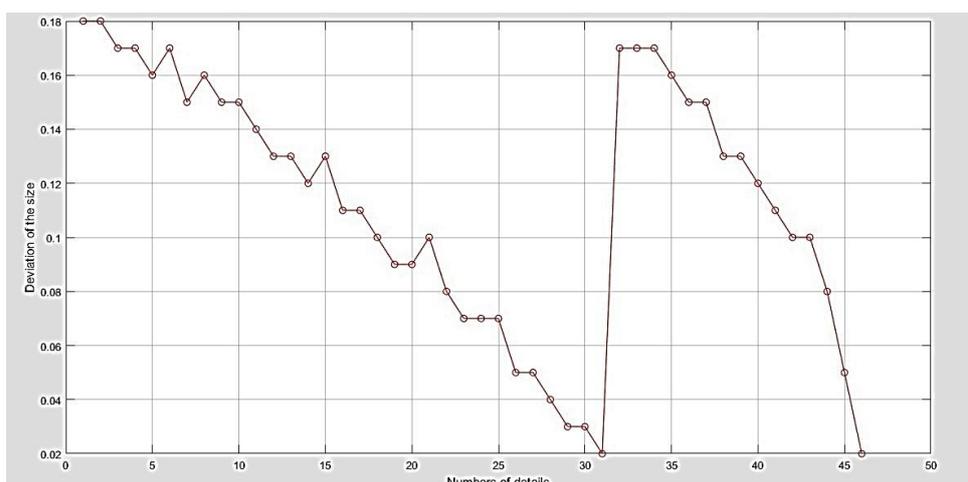


Рис. 3. Точностная диаграмма окончательной обработки дорожки качения кольца 42822 на токарном станке модели ПАБ-350

Результаты расчетов показателей колебательности по приведенным выше формулам представлены на рис. 4. Верхняя диаграмма отражает расчетные данные показателей колебательности, средняя – сглаженный ряд, нижняя – ряд первых разностей.

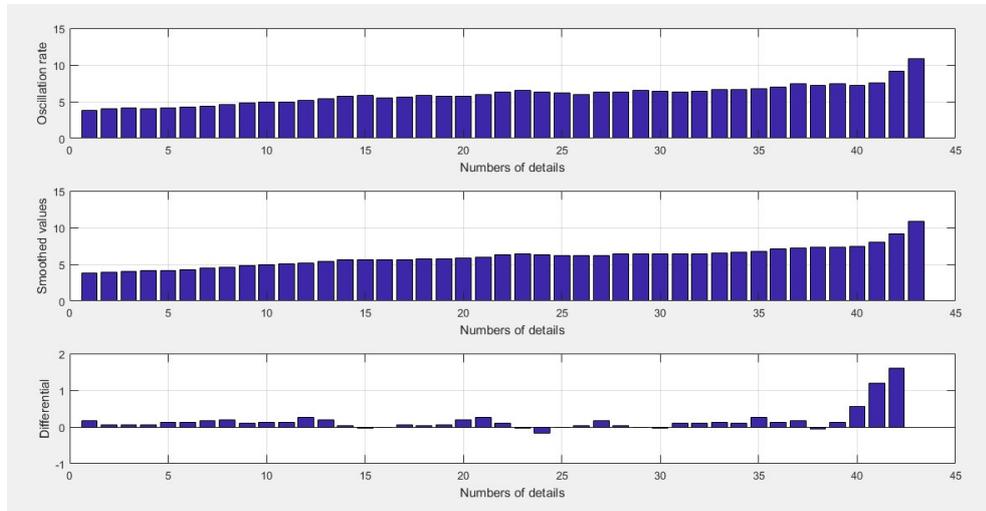


Рис. 4. Изменение показателей колебательности динамической системы и их первых разностей при окончательной обработке дорожки качения кольца 42822/01 на токарном станке модели ПАБ-350

Из рис. 4 видно, что до 43-го кольца показатели колебательности изменялись незначительно (от 4,2 до 5,4), но тренд на повышение прослеживается, т.е. запас устойчивости ДС незначительно снижался. Начиная с 43-го кольца наблюдается достаточно резкое снижение запаса устойчивости ДС (более чем на 20 %), что свидетельствует при сравнении с точностной диаграммой о наступлении катастрофического износа резца.

Для оценки степени связи изменения размеров колец с изменением запаса устойчивости ДС станка для окончательной операции точения дорожки качения выполнен расчет коэффициента парной корреляции по формуле

$$r_{dM} = \frac{n \sum_{i=1}^n M_i d_i - \sum_{i=1}^n M_i \sum_{i=1}^n d_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n M_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n M_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 \right]}}, \quad (15)$$

где M_i , d_i – пары реализаций корреляционных выборок показателей колебательности и отклонений размеров; n – объем выборок.

Для данных эксперимента, представленных на рис. 3 и 4, коэффициент корреляции равен $r_{dM} = -0,71$, что свидетельствует о достаточно сильной связи изменения размеров колец и показателей колебательности и, следовательно, сильной связи износа резца с запасом устойчивости ДС станка.

Таким образом, наиболее важным для автоматизированной обработки деталей является оперативное выявление начала катастрофического износа резца и своевременная его замена, причем в этом случае не только предот-

вращается брак деталей, но и более полно используются режущие свойства инструмента.

Дальнейшее развитие и внедрение результатов проведенных исследований связано с применением интеллектуальных технологий, в частности экспертных систем и нейронных сетей, что существенно повышает эффективность автоматизированного распознавания начальной фазы катастрофического износа резца при различных сочетаниях материалов инструмента и заготовки.

Заключение

По результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Предложена и реализована методика формирования оценок динамического качества станков на основе автоматизированной обработки измерительной информации о колебаниях динамической системы при резании, применяемая для распознавания начальной фазы катастрофического износа резца по изменению ее запаса устойчивости.

2. Результаты теоретического анализа стохастических колебаний в динамической системе станка позволили установить вид автокорреляционной функции и получить на ее основе передаточную функцию, что дало возможность вычислить показатель колебательности, с помощью которого оценивается запас устойчивости системы.

3. Разработана методика обучающего эксперимента по определению начальной фазы катастрофического износа резца при токарной обработке, включающая алгоритмизацию обработки виброизмерительной информации, основанная на сравнении тенденций изменения диаметральных размеров дорожек качения колец подшипников и запаса устойчивости динамической системы станка.

4. Результаты экспериментальных исследований точности обработки колец подшипников на токарном станке с ЧПУ с одновременным автоматизированным измерением виброакустических колебаний и вычислением показателей колебательности динамической системы подтвердили их корреляционную связь и возможность определения критерия для выявления начальной фазы катастрофического износа резца по существенному изменению (более чем на 50 %) первых разностей показателей колебательности.

Список литературы

1. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. Киев : Техника, 1975. 136 с.
3. Козочкин М. П. Влияние динамических характеристик станков на вибрации при резании // СТИН. 2014. № 2. С. 4–9.
4. Тугенгольд А. К., Димитров В. П., Волошин Р. Н., Борисова Л. В. Мониторинг состояния станков и станочных систем // СТИН. 2017. № 3. С. 11–17.
5. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Игнатъев С. А. Экспериментально-аналитическая оценка динамического качества станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2 (93). С. 38–52.
6. Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М. : Машиностроение, 1987. 224 с.

7. Аршанский М. М., Щербаков В. П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М. : Машиностроение, 1988. 136 с.
8. Бржозовский Б. М., Игнатъев А. А., Добряков В. А., Мартынов В. В. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков : в 3 ч. Саратов : Сарат. политехн. ин-т, 1994. Ч. 2. 156 с.
9. Игнатъев С. А., Коновалов В. В., Игнатъев С. А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов : СГТУ, 2014. 92 с.
10. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Ревякин В. А. Минимизация влияния колебательных процессов на качество деталей при обработке на прецизионных автоматизированных станках на основе системного подхода // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2023. № 3 (98). С. 20–30.
11. Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Добряков В. А. [и др.]. Назначение режима точения на основе оценки динамического качества станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 130–140.
12. Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Добряков В. А., Ревякин В. А. Модель динамической системы токарного станка при резании труднообрабатываемых материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 148–158.
13. Игнатъев А. А. Методы идентификации динамического качества станков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении : сб. науч. тр. Саратов : СГТУ, 2013. С. 85–91.
14. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации : учеб. пособие. СПб. : Севзапучцентр, 2013. 152 с.
15. Игнатъев А. А., Самойлова Е. М., Шамсадова Я. Ш. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 90–98.
16. Игнатъев А. А., Шамсадова Я. Ш., Игнатъев С. А. Применение интегральных оценок спектральных плотностей виброакустических колебаний для оценки динамического качества станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 94–98.
17. Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Насад И. П. Моделирование динамической системы токарного станка на основе оценки коэффициента затухания автокорреляционной функции колебаний // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 2. С. 17–22.
18. Lin Z. H. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures // Int. J. Mach. Tools Manufact. 1988. Vol. 28, № 2. P. 93–101.
19. Складчиков А. Н. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М. : Наука, 1965. 460 с.
20. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1975. 768 с.
21. Адомиан Дж. Стохастические системы / пер. с англ. Н. Г. Волкова. М. : Мир, 1987. 376 с.
22. Болотин В. В. Случайные колебания упругих систем. М. : Наука, 1979. 336 с.
23. Самойлова Е. М., Игнатъев А. А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей интегрированного производства : в 3 ч. Ч. 2. Динамическая экспертная система поддержки принятия решения. Саратов : СГТУ, 2018. 100 с.
24. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М. : Советское радио, 1974. 552 с.
25. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Игнатъев С. А. Автоматизированное распознавание катастрофического износа инструмента по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний. Саратов : СГТУ, 2020. 84 с.

References

1. Kudinov V.A. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Moscow: Mashinostroenie, 1967:360. (In Russ.)
2. Popov V.I., Loktev V.I. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Kiev: Tekhnika, 1975:136. (In Russ.)
3. Kozochkin M.P. The influence of dynamic characteristics of machine tools on vibrations during cutting. *STIN*. 2014;(2):4–9. (In Russ.)
4. Tugengol'd A.K., Dimitrov V.P., Voloshin R.N., Borisova L.V. Monitoring the condition of machines and machine systems. *STIN*. 2017;(3):11–17. (In Russ.)
5. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Experimental and analytical assessment of the dynamic quality of machine tools based on stochastic characteristics of vibroacoustic vibrations. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2022;(2):38–52. (In Russ.)
6. Dobrynin S.A., Fel'dman M.S., Firsov G.I. *Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin = Methods of automated study of machine vibration*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:224. (In Russ.)
7. Arshanskiy M.M., Shcherbakov V.P. *Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu na metallorezhushchikh stankakh = Vibration diagnostics and precision control on metal-cutting machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:136. (In Russ.)
8. Brzhozovskiy B.M., Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Martynov V.V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallorezhushchikh stankov: v 3 ch. = Accuracy and reliability of automated precision metal-cutting machines: in 3 parts*. Saratov: Sarat. politekhn. in-t, 1994;Pt.2:156. (In Russ.)
9. Ignat'ev S.A., Konovalov V.V., Ignat'ev S.A. *Identifikatsiya v dinamike stankov s ispol'zovaniem stokhasticheskikh metodov = Identification in machine tool dynamics using stochastic methods*. Saratov: SGTU, 2014:92. (In Russ.)
10. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. Minimizing the impact of oscillatory processes on the quality of parts when processing on precision automated machines based on a system approach. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Saratov State Technical University*. 2023;(3):20–30. (In Russ.)
11. Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Dobryakov V.A. et al. Assignment of the turning mode based on the assessment of the dynamic quality of the machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh za-vedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(2):130–140. (In Russ.)
12. Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. Model of the dynamic system of a lathe when cutting difficult-to-machine materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(2):148–158. (In Russ.)
13. Ignat'ev A.A. Methods of identification of dynamic quality of machine tools. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sb. nauch. tr. = Automation and control in mechanical engineering and instrument making: collected papers*. Saratov: SGTU, 2013:85–91. (In Russ.)
14. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii: ucheb. posobie = Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis: textbook*. Saint Petersburg: Sevzapuchtsentr, 2013:152. (In Russ.)
15. Ignat'ev A.A., Samoylova E.M., Shamsadova Ya.Sh. Evaluation of dynamic quality of machine tools using autocorrelation functions of vibroacoustic oscillations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(2):90–98. (In Russ.)
16. Ignat'ev A.A., Shamsadova Ya.Sh., Ignat'ev S.A. Application of integral estimates of spectral densities of vibroacoustic vibrations for assessing the dynamic quality of machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2018;(3):94–98. (In Russ.)

17. Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Nasad I.P. Modeling of the dynamic system of a lathe based on the assessment of the damping coefficient of the autocorrelation function of oscillations. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and information technology.* 2023;(2):17–22. (In Russ.)
18. Lin Z.H. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 1988;28(2):93–101.
19. Sklyarevich A.N. *Operatornye metody v statisticheskoy dinamike avtomaticheskikh sistem = Operator methods in statistical dynamics of automatic systems.* Moscow: Nauka, 1965:460. (In Russ.)
20. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya = Theory of automatic control systems.* Moscow: Nauka, 1975:768. (In Russ.)
21. Adomian Dzh. *Stokhasticheskie sistemy = Stochastic systems.* Transl. from Eng. by N.G. Volkov. Moscow: Mir, 1987:376. (In Russ.)
22. Bolotin V.V. *Sluchaynye kolebaniya uprugikh system = Random vibrations of elastic systems.* Moscow: Nauka, 1979:336. (In Russ.)
23. Samoylova E.M., Ignat'ev A.A. *Metody i algoritmy intellektualizatsii monitoringa tekhnologicheskikh sistem na osnove avtomatizirovannykh stanochnykh moduley integrirovannogo proizvodstva: v 3 ch. Ch. 2. Dinamicheskaya ekspertnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya = Methods and algorithms for intellectualization of monitoring of technological systems based on automated machine modules of integrated production: in 3 parts. Part 2. Dynamic expert decision support system.* Saratov: SGTU, 2018:100. (In Russ.)
24. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki = Theoretical foundations of statistical radio engineering.* Moscow: Sovetskoe radio, 1974:552. (In Russ.)
25. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. *Avtomatizirovannoe raspoznavanie katastroficheskogo iznosa instrumenta po stokhasticheskim kharakteristikam vibroakusticheskikh kolebaniy = Automated recognition of catastrophic tool wear based on stochastic characteristics of vibroacoustic vibrations.* Saratov: SGTU, 2020:84. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Анатольевич Игнатьев
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технической
механики и мехатроники, Саратовский
государственный университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Владимир Анатольевич Добряков
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технической механики
и мехатроники, Саратовский
государственный университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Aleksandr A. Ignat'ev
Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of technical
mechanics and mechatronics, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov
(77 Politehnicheskaya street, Saratov,
Russia)

Vladimir A. Dobryakov
Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of technical
mechanics and mechatronics, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov
(77 Politehnicheskaya street, Saratov, Russia)

Владислав Анатольевич Ревякин

старший преподаватель кафедры
технической механики и мехатроники,
Саратовский государственный
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: tmm@sstu.ru

Vladislav A. Revyakin

Senior lecturer of the sub-department
of technical mechanics and mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov (77 Politehnicheskaya street,
Saratov, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 12.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.02.2025

Принята к публикации / Accepted 02.03.2025

УДК 62-233.3/9

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-8

Моделирование движения в циклоидальной передаче. Часть II. Нагруженная передача

Е. А. Чуфистов¹, О. Е. Чуфистов², М. Благоевич³, М. Васич⁴

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

³Университет Крагуеваца, Крагуевац, Сербия

⁴Академия прикладных технических исследований, Белград, Сербия

¹ea_tchufistov@mail.ru, ²tchufistov@mail.ru, ³mirkob@kg.ac.rs, ⁴mvasic@atssb.edu.rs

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается движение в нагруженной планетарно-цевочной (циклоидальной) передаче, выполненной по схеме $k-h-v$. Представленное исследование объединяет кинематический анализ с анализом угловой жесткости передачи. Методика расчета погрешности вращения выходного звена передачи основана на выявлении действующих в передаче сил с учетом погрешностей изготовления деталей передачи и геометрических соотношений в самой передаче и влияния их на ошибку угла поворота выходного вала. Целью являются методика и алгоритм, позволяющие установить закон вращения ведомого звена нагруженной передачи. *Материалы и методы.* Деформации в контактных парах определены методом проектирования погрешностей изготовления, модификации профиля зубьев и перемещения профилей зубьев вследствие нагружения передачи на профильную контактную нормаль. Характеристики жесткости контактной пары определяются с использованием классической контактной механики Герца. Силы в зацеплении в произвольном положении сателлита и цевочного колеса рассчитываются по итерационному алгоритму. Для получения количественных характеристик применено компьютерное моделирование в системе Mathcad. *Результаты.* Предложен алгоритм расчета ошибки угла поворота ведомого звена нагруженной планетарно-цевочной передачи с модификацией профиля зубьев сателлита и эксцентриситетом сателлита. Выполнены расчеты и анализ полученных результатов. Показано влияние нагрузки на точность вращения в передаче. *Выводы.* Предложенное решение позволяет учитывать совместное влияние равномерной модификации профилей зубьев, эксцентриситета сателлита и нагрузки на ошибку угла поворота выходного звена нагруженной передачи. Для создания отвечающих современным требованиям точных приводов необходимы методики, учитывающие интегральные кинематические и деформационные характеристики зацепления.

Ключевые слова: циклоидальные передачи, зацепление, модификация профиля, эксцентриситет, угол упругого поворота, крутильная жесткость, погрешность вращения

Для цитирования: Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е., Благоевич М., Васич М. Моделирование движения в циклоидальной передаче. Часть II. Нагруженная передача // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 92–105. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-8

Simulation of motion in a cycloidal gear. Part II. Loaded gear

E.A. Tchufistov¹, O.E. Tchufistov², M. Blagojević³, M. Vasic⁴

¹Penza State University, Penza, Russia

© Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е., Благоевич М., Васич М., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

²Penza State Technological University, Penza, Russia³University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia⁴Academy of Applied Technical Studies Belgrade, Belgrade, Serbia¹ea_tchufistov@mail.ru, ²tchufistov@mail.ru, ³mirkob@kg.ac.rs, ⁴mvasic@atssb.edu.rs

Abstract. *Background.* The article considers the motion in a planetary-pinion (cycloidal) gear made according to the $k-h-v$ scheme. The presented research combines kinematic analysis with analysis of angular stiffness of gear. The method of calculating the rotation inaccuracy of the output element of gear is based on identifying the forces acting in the gear, taking into account the manufacturing inaccuracies of gear details and geometric ratios in the gear itself and their effect on the inaccuracy of the angle of rotation of the output shaft. The purpose of the study is to use techniques and algorithms to establish the law of rotation of the driven element of the loaded gear. *Materials and methods.* Deformations in contact pairs are determined by the method of designing manufacturing inaccuracies, modifying the tooth profile and moving the tooth profiles due to the loading of the gear on the profile contact normal. The stiffness characteristics of the contact pair are determined using classical Hertz contact mechanics. The tooth forces in an arbitrary position of the satellite and the pinwheel are calculated using an iterative algorithm. To obtain quantitative characteristics, computer modeling in the Mathcad system is used. *Results.* An algorithm is proposed for calculating the inaccuracy of the rotation angle of the driven element of a loaded planetary-pinion gear with modification of the profile of the teeth of the satellite and the eccentricity of the satellite. Calculations and analysis of the obtained results are performed. The influence of the load on the accuracy of rotation in the gear is shown. *Conclusions.* The proposed solution allows us to take into account the combined effect of uniform modification of tooth profiles, satellite eccentricity and load on the inaccuracy of the angle of rotation of the output element of the loaded gear. To create precision drives that meet modern requirements, techniques are needed that take into account the integral kinematic and deformation characteristics of toothing.

Keywords: cycloidal gears, toothing, profile modification, eccentricity, elastic rotation angle, torsional stiffness, rotation inaccuracy

For citation: Tchufistov E.A., Tchufistov O.E., Blagojević M., Vasic M. Simulation of motion in a cycloidal gear. Part II. Loaded gear. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):92–105. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-8

Введение

Особенность геометрии передач с циклоидально-цевочным зацеплением обеспечивает им потенциальные преимущества по массе, размерам, надежности, шуму, коэффициенту полезного действия, инерционности, жесткости. Однако перечисленные возможности в значительной степени зависят от точности изготовления деталей передачи. Погрешности изготовления могут создавать опасность того, что собираемость передачи будет невозможна. Для сборки передачи при ее проектировании и изготовлении вводят модификацию профилей зубьев. Кроме собираемости, она позволяет улучшать смазку и некоторые показатели передачи. Широко применяется модификация, при которой профили зубьев сателлитов эквидистантны теоретическим. При этом в зацеплении образуются одинаковые зазоры. Зазоры и погрешности изготовления передачи влияют на люфт, погрешность вращения и крутильную жесткость передачи, которые относятся к основным для прецизионных передач.

Погрешности вращения выходного вала в циклоидальной передаче с зазором в зацеплении и с погрешностями изготовления без нагрузки рассматривались в ряде работ. В моделях, рассмотренных в [1–3], детали абсо-

лютно жесткие, трение в контакте отсутствует. Учитывалось отклонение межосевого расстояния в передаче, эксцентриситет зубчатого венца сателлита и цевочного колеса, отклонение радиуса окружности центров цевок, координат центров цевок и радиусов цевок.

В статье [4] для трансмиссии типа $2k-v$ установлена связь между точностью передачи и погрешностью фактического профиля зубчатых колес, подтвержденная экспериментально. В работе [5] исследовано влияние геометрических погрешностей на отклонения положения планетарных передач и величину люфта и возможность появления нагрузки между нерабочими профилями. В публикации [6] изучено влияние различных методов модификации на ошибку возврата. В работе [7] исследовалось влияние ошибок изготовления и сборки на погрешность передачи вращения в планетарных передачах $k-h-v$ с циклоидальным зацеплением.

В приведенных работах не учитываются деформации контактных пар под нагрузкой. В статье [8] представлен анализ крутильной жесткости циклоидной передачи с учетом допусков с помощью кинематического анализа, теории Герца и FE-моделей. Установлено, что с увеличением зазоров жесткость при кручении циклоидального редуктора уменьшается, а максимальная сила в контакте увеличивается. В работе [9] исследована характеристика, названная авторами потерянными движением, учитывающая геометрический люфт и гистерезис в циклоидальном редукторе. В публикациях [10, 11] установлены некоторые закономерности нагружения элементов передачи в неподвижной и работающей передаче.

В приведенных работах не исследовались ошибки угла поворота в работающей передаче с учетом деформаций элементов передачи. Учет упругих деформаций звеньев циклоидальной цевочной передачи с зазорами и погрешностями изготовления ее деталей позволит уточнить значение ошибки угла поворота выходного вала. Задачей данной работы является определение погрешностей положения выходного вала с учетом деформаций.

1. Материалы и методы

1.1. Модель передачи с зазором под нагрузкой

На рис. 1 показана расчетная схема, когда в зацеплении имеется зазор Δ_z , одинаковый во всех контактных парах. Нагружение передачи происходит вследствие поворота сателлита относительно т. O_c – центра сателлита. Вначале сателлит поворачивается на угол β_{bac} для выбора люфта в одной контактной паре, при этом в остальных контактных парах зазоры также уменьшаются. Угол β_{bac} можно приближенно определить по формуле

$$\beta_{bac} = \Delta_z / r_{w1}, \quad (1)$$

где r_{w1} – радиус начальной окружности сателлита.

После этого деформируется первая контактная пара, а по мере увеличения момента до номинального значения деформируются и другие контактные пары, сателлит поворачивается на угол упругого поворота β_{el} , образуется зона контакта. Полный угол поворота сателлита:

$$\beta = \beta_{bas} + \beta_{el}. \quad (2)$$

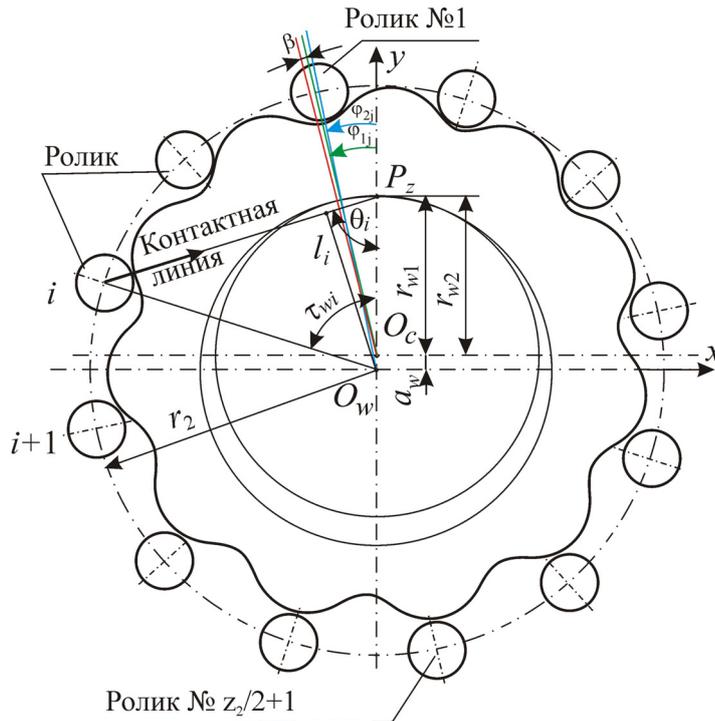


Рис. 1. Схема для расчета угла упругого поворота в передаче с зазором

Угол упругого поворота определим по контактной паре, в которой действует максимальная сила $F_{z\max}$:

$$\beta_{el} = F_{z\max} / (cr_{w1}), \quad (3)$$

где c – коэффициент контактной жесткости для этой пары. В первом приближении можно считать его одинаковым для всех контактных пар.

Максимальная сила в контактной паре [10, 11]:

$$F_{z\max} = 4k_z T_c (r_{w1} z_2)^{-1}, \quad (4)$$

где T_c – вращающий момент на сателлите; k_z – коэффициент увеличения максимальной силы в зацеплении; z_2 – число зубьев цевочного колеса.

Тогда получаем

$$\beta_{el} = 4k_z T_c (cr_{w1}^2 z_2)^{-1}. \quad (5)$$

Для определения k_z воспользуемся решением, предложенным в [10]:

$$k_z = \pi \left\{ (1 + p_{un}) \left[\pi - 2 \arcsin \frac{p_{un}}{1 + p_{un}} - 2 \frac{p_{un}}{1 + p_{un}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_{un}}{1 + p_{un}} \right)^2} \right] \right\}^{-1}, \quad (6)$$

где p_{un} – параметр упругого нагружения,

$$p_{un} = k_K \pi \Delta_z z_2 E b r_{w1} \left\{ 8 T_c (1 - v^2) \left[\ln \frac{z_2 r_{w1} \pi E b r_2 \sqrt{1 - \lambda^2}}{8 k_z T_c (1 - v^2)} + 0,815 \right] \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где λ – коэффициент укорочения эпициклоиды $\lambda = r_{w2} / r_2$; r_{w2} – радиус начальной окружности цевочного колеса; E – модуль упругости; v – коэффициент Пуассона; b – ширина сателлита; k_K – коэффициент, учитывающий дополнительные, к контактным, деформации в зацеплении.

Величины k_z и p_{un} могут быть найдены из (6) и (7), например, методом итераций. При повороте сателлита и цевочного колеса из начального положения меняется относительное расположение элементов зацепления, направления сил в контакте, вследствие этого меняется крутильная жесткость передачи, угол упругого поворота и полный угол поворота сателлита относительно цевочного колеса. Для определения ошибок угла поворота сателлита и цевочного колеса цевочное колесо поворачиваем дискретно на угол $\varphi_{2j} = 2\pi j / (z_2 n)$, где $j = 1, 2, \dots, n$, при этом сателлит поворачивается на угол $\varphi_{1j} = 2\pi j / (z_1 n)$, после чего зацепление нагружаем поворотом сателлита на угол $\beta = \beta_0$ и для каждой контактной пары определяем деформацию и силу:

$$F_i = c \delta_i = c (\beta r_{w1} \sin \theta_i - \Delta_z), \quad (8)$$

где θ_i вычисляются по формуле

$$\theta_i = \arctg \frac{\sin \tau_{wi}}{\lambda - \cos \tau_{wi}}. \quad (9)$$

По положительным значениям F_i вычисляется вращающий момент T_c :

$$T_c = \sum F_i l_i = \sum c (\beta r_{w1} \sin \theta_i - \Delta_z) r_{w1} \sin \theta_i. \quad (10)$$

Он должен быть равен заданному номинальному значению. Так как β_0 – приближенное значение, то это условие не выполняется. Поэтому значения β уточняют по формуле, полученной из равенства расчетного и требуемого значений момента:

$$\beta_{k+1} = \beta_k + \frac{T_c - T_{ck}}{c r_{w1}^2 \sum_{i=p}^q \sin^2 \theta_i},$$

где $k, k+1$ – номера итераций; p, q – номера контактных пар, являющиеся границами диапазона, в котором $\delta_i > 0$, на k -й итерации; T_{ck} – вращающий момент на сателлите на k -й итерации.

В результате итерационного процесса можно определить угол поворота сателлита β и с учетом (1) и (2) угол упругого поворота β_{el} . По β и β_{el}

определяют угол упругого поворота и полную ошибку поворота цевочного колеса вокруг центра O_w :

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{wel} &= \beta_{el} z_1 / z_2, \\ \Delta\varphi_w &= \beta z_1 / z_2.\end{aligned}\quad (11)$$

1.2. Модель передачи с зазором и эксцентриситетом под нагрузкой

В начальном положении ось симметрии впадины, которой присвоен № 1, располагается на оси ординат вместе с роликом № 1 (рис. 2). Зубчатый венец сателлита имеет смещение e_s от точки O_c – центр отверстия под подшипник, до O'_c – центр зубчатого венца, в направлении вектора эксцентриситета, определяемом углом ξ . Из-за этого точка профиля сателлита i , расположенная на пересечении профиля зуба сателлита с профильной нормалью, перемещается к ролику на величину

$$-e_s \cos(\xi + \theta_i). \quad (12)$$

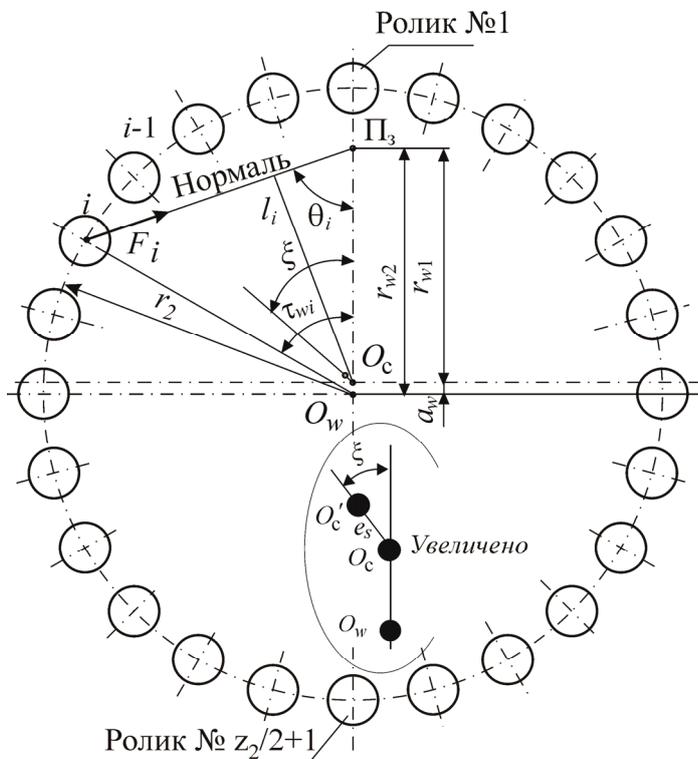


Рис. 2. Схема для расчета угла упругого поворота в зацеплении с зазором и эксцентриситетом

Поворачивая сателлит относительно оси отверстия под подшипник O_c , получим для деформации в контактных парах следующую зависимость:

$$\delta_i = \beta l_i - e_s \cos(\xi + \theta_i) - \Delta_z.$$

Если $\delta < 0$, то в паре «цевка – зуб сателлита» остается зазор. Пренебрегаем, вследствие малости, влиянием эксцентриситета на плечо l_i силы F_i , действующей в зацеплении, и принимаем $l_i = r_{w1} \sin \theta_i$. Теперь

$$\delta_i = \beta r_{w1} \sin \theta_i - e_s \cos(\xi + \theta_i) - \Delta_z. \quad (13)$$

Угол β по-прежнему равен $\beta = \beta_{bas} + \beta_{el}$. Однако вследствие смещения зубчатого венца в направлении вектора эксцентриситета зазоры еще до поворота на угол β в контактных парах разные. Угол θ_m , определяющий положение контактной пары с минимальным зазором, может быть определен из условия $\frac{d\delta}{d\theta} = 0$. Тогда угол поворота сателлита, необходимый для выбора люфта, равен

$$\beta_{bac} = \frac{1}{r_{w1}} \left(\frac{\Delta_z + e_s \cos \xi \cos \theta_m}{\sin \theta_m} - e_s \sin \xi \right). \quad (14)$$

Деформация в контактной паре:

$$\delta_i = \beta_{el} r_{w1} \sin \theta_i - e_s \cos \xi \left(\cos \theta_i - \frac{\sin \theta_i}{\operatorname{tg} \theta_m} \right) - \Delta_z \left(1 - \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_m} \right). \quad (15)$$

Сила в контакте:

$$F_i = c \left[\beta_{el} r_{w1} \sin \theta_i - e_s \cos \xi \left(\cos \theta_i - \frac{\sin \theta_i}{\operatorname{tg} \theta_m} \right) - \Delta_z \left(1 - \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_m} \right) \right]. \quad (16)$$

Вращающий момент на сателлите, создаваемый силами, действующими на зубья сателлита по аналогии с (10):

$$T_s = \sum c \left[\beta_{el} r_{w1} \sin \theta_i - e_s \cos \xi \left(\cos \theta_i - \frac{\sin \theta_i}{\operatorname{tg} \theta_m} \right) - \Delta_z \left(1 - \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_m} \right) \right] r_{w1} \sin \theta_i, \quad (17)$$

где суммирование распространяется на нагруженные контактные пары, для которых выражение в квадратных скобках больше нуля.

Получить формулу для β_{el} из приведенных выражений достаточно сложно, поэтому предлагается следующий алгоритм. Вначале рассматривается начальное положение сателлита и цевочного колеса. На первом шаге расчет выполняется без учета эксцентриситета, как это изложено выше. Затем корректируется угол упругого поворота для того, чтобы момент на сателлите с учетом эксцентриситета был равен заданному. В результате определяются общий угол поворота сателлита и угол его упругого поворота для этого положения.

Задача определения ошибки угла поворота цевочного колеса при изменении положения звеньев передачи, т.е. в работающей передаче, концептуально решается, как и для передачи, без эксцентриситета. Цевочное колесо поворачивают дискретно на угол $\varphi_{2j} = 2\pi j / (z_2 n)$, где $j = 1, 2, \dots, n$, после чего зацепление нагружают поворотом сателлита на угол β_0 и для каждой кон-

тактной пары определяют деформацию и силу. Необходимо учитывать, что при повороте цевочного колеса на дискретный угол $\Delta\varphi_2 = 2\pi/(z_2n)$ сателлит поворачивается на угол $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 z_2/z_1$. При этом изменяются не только положения нормалей, но и положение вектора эксцентриситета. Угол вектора эксцентриситета в работающей передаче $\xi_j = \xi_0 + 2\pi(j-1)/(z_2n)$. Далее по формуле (16) вычисляются силы, и для $F_i > 0$ по формуле (17) вычисляется вращающий момент. Углы поворота для каждого положения корректируются для достижения заданного момента.

2. Результаты

На рис. 3 представлены результаты расчетов, выполненных в Mathcad, для нагруженной передачи с параметрами, приведенными в табл. 1 для вариантов 1 и 2.

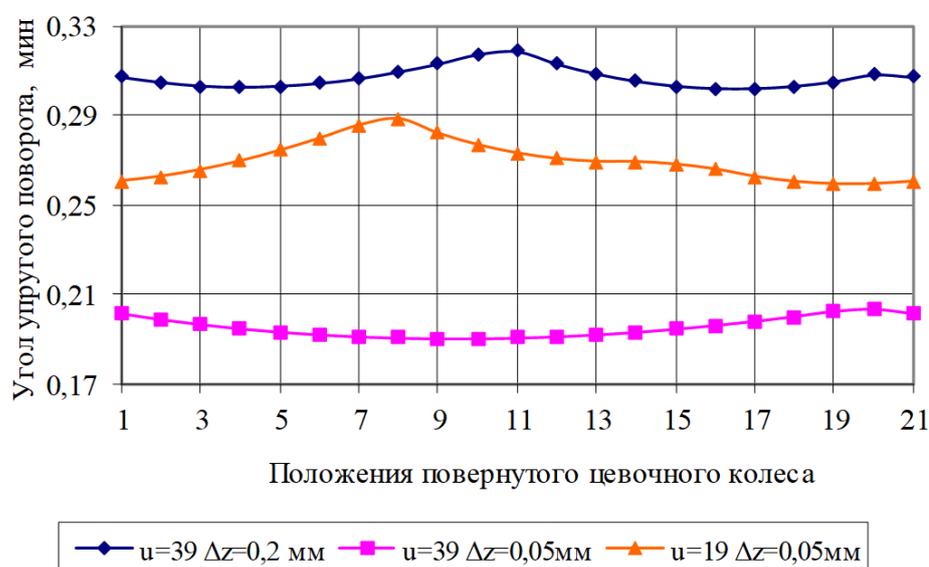


Рис. 3. График зависимости угла упругого поворота сателлита от угла поворота цевочного колеса при работе передачи

Таблица 1

Величина	Характеристика		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Номинальный вращающий момент на сателлите, Нм	100		350
Передаточное отношение	39	19	17
Диаметр окружности расположения роликов, мм	115	127	200
Расчетное межосевое расстояние, мм	1,078	2,381	4,146
Коэффициент укорочения эписциклоиды λ	0,75		

Рисунок 3 иллюстрирует влияние зазоров и чисел зубьев передачи на угол упругого поворота. Числа по горизонтальной оси определяют положение

ния цевочного колеса при его повороте на один угловой шаг. При этом положение 1 соответствует $\varphi = 0$ – начальное положение. Весь угловой шаг разделен на 20 равных углов, характеризующих дискретность поворота. Для передачи с $u = 39$ и $z_2 = 40$ они равны $0,45^\circ$, а для передачи с $u = 19$ и $z_2 = 20$ – $0,9^\circ$.

На рис. 4 [11] показаны ошибка угла поворота цевочного колеса ненагруженной передачи (рис. 4,а), а также ошибка угла поворота в нагруженной передаче (рис. 4,б). Параметры передачи: передаточное отношение (число зубьев сателлита) $z_1 = 33$, число зубьев цевочного колеса $z_2 = 34$, межосевое расстояние $a_w = 1,985$ мм, коэффициент укорочения эциклоиды $\lambda = 0,75$, зазор в зацеплении $\Delta_z = 0,05$ мм, номинальный вращающий момент на сателлите 350 Нм.

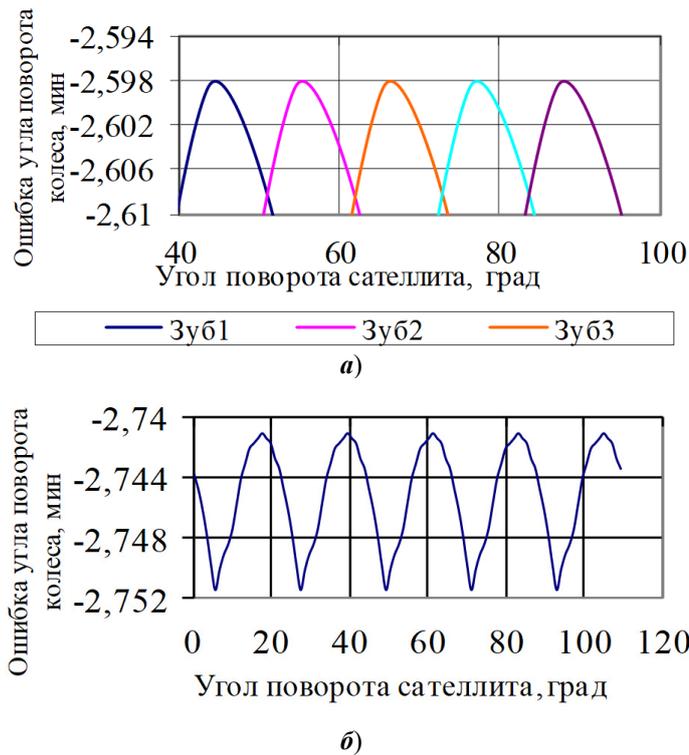


Рис. 4. График зависимости ошибки угла поворота цевочного колеса

На рис. 5 показаны зависимости для углов упругого поворота для передачи с зазором и эксцентриситетом, с параметрами, приведенными в табл. 1, вариант 3. Кроме того, показаны углы упругого поворота цевочного колеса для трех угловых шагов для передачи без эксцентриситета.

Для первой контактной пары в начальном положении вектор эксцентриситета направлен по вертикальной оси. В процессе поворота он меняет свое направление. Для второй контактной пары начальный угол вектора эксцентриситета равен угловому шагу сателлита. По горизонтальной оси отложены дискретные угловые шаги ($1/20$ углового шага цевочного колеса).

По вертикальной оси отложены углы упругого поворота сателлита β_{el} для передачи с эксцентриситетом.



Рис. 5. Угол упругого поворота:
передача 1 – с эксцентриситетом, 2 – без эксцентриситета

Из рис. 5 видно, что углы упругого поворота, когда вектор эксцентриситета образует с вертикальной осью симметрии относительно небольшие углы, больше (например, положения 141–221), чем в других положениях.

На рис. 6 показана ошибка угла поворота цевочного колеса $-\beta z_1/z_2$ в передаче с зазором и эксцентриситетом.



Рис. 6. Полный угол поворота (ошибка угла поворота) цевочного колеса

3. Обсуждение

Деформации зацепления под нагрузкой (см. рис. 3) меняют закон вращения ведомого звена. Так как положение и деформации контактных пар при вращении звеньев меняются: одни контактные пары входят в зону максимальных нагрузок, другие выходят, то угол упругого поворота β_{el} является функцией угла поворота φ . Из рис. 3 видно, что эта функция периодическая. Максимальное значение угла упругого поворота соответствует тому положению, при котором крутильная жесткость зацепления минимальна.

С увеличением зазора в зацеплении крутильная жесткость передачи снижается, а угол упругого поворота и ошибка угла поворота ведомого звена увеличиваются. Для приведенного примера при увеличении зазора от 0,05 до

0,2 мм угол упругого поворота увеличился в среднем на 15 %. Аналогично влияет и уменьшение передаточного отношения, которое тоже приводит к уменьшению числа контактных пар и крутильной жесткости передачи. При уменьшении передаточного отношения с 39 до 19, и числа цевок с 40 до 20 угол упругого поворота увеличился примерно на 35 %.

Из рис. 5 видно, что ошибка угла поворота нагруженной передачи больше, чем у ненагруженной, видимо, вследствие сложений кинематической погрешности и ошибки угла вследствие деформаций по средним значениям примерно на $\approx 9,7$ с. Однако размахи ошибок примерно одинаковые : $\approx 0,62$ с и $\approx 0,66$ с. Экстремум угла упругого поворота смещен относительно экстремума общей ошибки поворота.

Расчеты, выполненные для нагруженных передач с зазором в зацеплении и эксцентриситетом (смещением) зубчатого венца сателлита, показывают существенное влияние эксцентриситета на угол упругого поворота, а следовательно, и на ошибку угла поворота ведомого звена передачи. Влияние эксцентриситета на угол упругого поворота и силу в контактной паре определяется расположением вектора эксцентриситета по отношению к контактной нормали. Если угол, определяющий направление вектора эксцентриситета, меньше $\pi/2 - \theta$, то эксцентриситет увеличивает зазор в контактной паре и уменьшает силу, а если больше, то уменьшает зазор и увеличивает силу. Максимальное уменьшение зазора и увеличение деформации и контактной силы определяется совместным влиянием перемещения в контакте вследствие поворота сателлита и эксцентриситета. При малых углах вектора эксцентриситета в зоне, близкой к полюсу зацепления, где и без эксцентриситета силы большие, они еще более увеличиваются. В работающей передаче ошибка угла поворота цевочного колеса циклически меняется.

Заключение

Деформации под нагрузкой существенно меняют закономерности движения и погрешность вращения в планетарно-цевочных передачах. Ошибка угла поворота так же, как и кинематическая погрешность, периодическая, но всплески на кривой определяются главным образом периодическим изменением крутильной жесткости зацепления. Смещение зубчатого венца сателлита относительно оси отверстия под подшипник, эксцентриситет сателлита, меняет картину силового нагружения зацепления. В контактных парах, в направлении которых смещен зубчатый венец, силы возрастают. Вследствие этого меняется также угол упругого поворота сателлита. Результат определяется конкретным сочетанием параметров, модификацией профиля, погрешностей изготовления, приложенной нагрузкой. Для более качественного проектирования передач, к которым предъявляются повышенные требования к точности вращения, необходим учет совместного влияния погрешностей изготовления и нагрузок. Предлагаемое решение дает более полное представление о работе планетарно-цевочных передач. Исследования в данном направлении должны быть продолжены.

Список литературы

1. Родиков А. В. Влияние первичных ошибок зацепления планетарной цевочной передачи на кинематическую точность вращения выходного вала // Автомобиле- и

- тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 17 ноября 2010 г.). М. : МГТУ «МАМИ», 2010. С. 106–109.
2. Родиков А. В., Гуреев Е. А. Влияние ошибки окружного шага сателлита планетарной цевочной передачи на кинематическую точность вращения выходного вала // Сборник трудов молодых ученых Пензенского государственного университета. Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. С. 57–61.
 3. Егоров И. М., Алексанин С. А., Федосовский М. Е., Кряжева Н. П. Математическое моделирование погрешностей изготовления элементов цевочной передачи планетарного редуктора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 171–176.
 4. Li C., Liu J., Sun T. Study on transmission precision of cycloidal pin gear in 2K-V planetary drives // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2001. Vol. 37, № 4. P. 61–65.
 5. Shirokoshi N., Hidaka T., Kasei S. Studies of influences of geometrical errors to final performances in small backlash planetary gears. Relations among position deviations of planet gears, target of backlash and nonworking flank load // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C. 2000. Vol. 66, № 646. P. 1950–1958.
 6. Guan T. M. Calculation and analysis on the return error resulting from cycloid-disk modification in the cycloid drive // Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique. 2001. Vol. 10. P. 15–18.
 7. Hidaka T., Wang H., Ishida T., Matsumoto K., Hashimoto M. Rotational transmission error of K-H-V planetary gears with cycloid gear // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C. 1994. Vol. 60, № 570. P. 645–653.
 8. Anh Duc Pham, Linh Tran [et al.]. Torsional rigidity analysis of cycloid reducers considering tolerances // 16th Asia Pacific Vibration Conference (24–26 November, 2015 HUST). 2015. doi: 10.15625/vap.2016.000088
 9. Linh Tran, Anh Duc Pham, Hyeong-Joon Ahn. Lost Motion Analysis of one stage cycloid reducer considering tolerances // International journal of precision engineering and manufacturing. 2016. Vol. 17, № 8. P. 1009–1016.
 10. Tchufistov E. A., Tchufistov O. E. Simulation of satellite bearings loading in planetary cycloid gear // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971 (4).
 11. Чуфистов Е. А., Чуфистов О. Е., Благоевич М., Васич М. Моделирование движения в циклоидальной передаче. Часть I. Ненагруженная передача // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 92–108. doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-8

References

1. Rodikov A.V. The influence of primary engagement errors of the planetary pinion gear on the kinematic accuracy of rotation of the output shaft. *Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Moskva, 17 noyabrya 2010 g.) = Automobile and tractor manufacturing in Russia: development priorities and personnel training: proceedings of the International scientific and engineering conference (Moscow, November 17, 2010)*. Moscow: MGTU «МАМИ», 2010:106–109. (In Russ.)
2. Rodikov A.V., Gureev E.A. The influence of the error of the circumferential pitch of the planetary pinion gear on the kinematic accuracy of rotation of the output shaft. *Sbornik trudov molodykh uchenykh Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Collection of works of young scientists of Penza State University*. Penza: Izd-vo PGU, 2011:57–61. (In Russ.)
3. Egorov I.M., Aleksanin S.A., Fedosovskiy M.E., Kryazheva N.P. Mathematical modeling of manufacturing errors in the elements of the planetary gearbox pinion transmis-

- sion. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2014;(6):S. 171–176. (In Russ.)
4. Li C., Liu J., Sun T. Study on transmission precision of cycloidal pin gear in 2K-V planetary drives. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2001;37(4):61–65.
 5. Shirokoshi N., Hidaka T., Kasei S. Studies of influences of geometrical errors to final performances in small backlash planetary gears. Relations among position deviations of planet gears, target of backlash and nonworking flank load. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*. 2000;66(646):1950–1958.
 6. Guan T.M. Calculation and analysis on the return error resulting from cycloid-disk modification in the cycloid drive. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*. 2001;10:15–18.
 7. Hidaka T., Wang H., Ishida T., Matsumoto K., Hashimoto M. Rotational transmission error of K-H-V planetary gears with cycloid gear. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*. 1994;60(570):645–653.
 8. Anh Duc Pham Torsional rigidity analysis of cycloid reducers considering tolerances Conference Paper November 2015 DOI: 10.15625/vap.2016.000088 16th Asia Pacific Vibration Conference 24-26 November, 2015 HUST, Hanoi, Vietnam.
 9. Linh Tran, Anh Duc Pham, and Hyeong-Joon Ahn Lost Motion Analysis of one stage cycloid reducer considering tolerances International journal of precision engineering and manufacturing Vol. 17, No. 8, pp. 1009-1016 2016 / 1009 KSPE and Springer 2016.
 10. Tchufistov E A and Tchufistov O E Simulation of satellite bearings loading in planetary cycloid gear IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 971(4).
 11. Tchufistov E.A., Tchufistov O.E., Blagojević M., Vasic M. Simulation of motion in a cycloidal gear. Part I: unloaded gear. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):92–108. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-8

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Алексеевич Чуфистов

кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных машин, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ea_tchufistov@mail.ru

Evgeniy A. Tchufistov

Candidate of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of transport machines, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Евгеньевич Чуфистов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Пензенский государственный технологический университет (Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: tchufistov@mail.ru

Oleg E. Tchufistov

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of mechanical engineering technology, Penza State Technological University (1a/11 Baydukova passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Мирко Благович

профессор инженерного факультета, Крагуевацкий университет (Сербия, г. Крагуевац, ул. Сестры Янич, 6)

E-mail: mirkob@kg.ac.rs

Mirko Blagojević

Professor of the faculty of engineering, University of Kragujevac (6 Sestre Janic street, Kragujevac, Serbia)

Милан Васич

аспирант технического колледжа
прикладных исследований, Академия
прикладных технических исследований
Белграда (Сербия, г. Белград,
ул. Катарине Амброзиц, 3)

E-mail: mvasic@atssb.edu.rs

Milan Vasic

Postgraduate student of technical
college of applied studies, The Academy
of Applied Technical Studies Belgrade
(3 Katarine Ambrozić street,
Belgrade, Serbia)

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

Поступила в редакцию / Received 07.05.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 04.09.2024

Принята к публикации / Accepted 27.12.2024

УДК 67.05, 658.5.012.1, 658.511
doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-9

Оптимизация загрузки станков производственных участков изготовления деталей

В. В. Коновалов¹, М. В. Донцова², А. Н. Расстегаев³, В. Ю. Зайцев⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹konovalov-penza@rambler.ru, ²dontmv@mail.ru,
³ran-tms@yandex.ru, ⁴vluzai@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследований является разработка компьютерной модели оптимизации загрузки станков одной классификационной группы, но различного типа, имеющегося парка технологического оборудования предприятия. *Материалы и методы.* Исследования предусматривали разработку методики и алгоритма расчета, реализованных в математическом пакете MatchCAD в виде компьютерной модели сравнительной оценки и оптимизации расчета количества деталей, обрабатываемых станками разного типа на основе имеющихся на производстве ограничений. *Результаты.* Разработанная методика позволила составить на ее основе алгоритм расчета. Реализованная компьютерная модель в математическом пакете MatchCAD позволяет производить оптимизацию значений количества деталей, обрабатываемых в каждой группе, но станками разных типов, путем поочередной оптимизации по минимуму эксплуатационных затрат, по минимуму энергозатрат и по минимуму трудозатрат. Найденная разница значений между вариантом минимального производственного цикла изготовления партии деталей и показателями после разных вариантов оптимизации позволяет сопоставить результаты различных способов загрузки оборудования для наиболее эффективного его использования. *Выводы.* На основе сравнения производственной программы типов станков по разным вариантам оптимизации находится наиболее приемлемый вариант производственной программы реализации технического задания (заказа, партии).

Ключевые слова: машиностроительные станки, технологические операции, оптимизация технологического процесса, распределение нагрузки участка

Для цитирования: Коновалов В. В., Донцова М. В., Расстегаев А. Н., Зайцев В. Ю. Оптимизация загрузки станков производственных участков изготовления деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 106–116. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-9

Optimization of loading of machines in production areas for parts manufacturing

V.V. Konovalov¹, M.V. Dontsova², A.N. Rasstegaev³, V.Yu. Zaitsev⁴

^{1,2,3,4}Penza State Technological University, Penza, Russia

¹konovalov-penza@rambler.ru, ²dontmv@mail.ru,
³ran-tms@yandex.ru, ⁴vluzai@gmail.com

Abstract. *Background.* The purpose of the research is to develop a computer model for optimizing the loading of machines of the same classification group, but of different types, of the existing fleet of technological equipment of the enterprise. *Materials and methods.*

© Коновалов В. В., Донцова М. В., Расстегаев А. Н., Зайцев В. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

The research provided for the development of a calculation methodology and algorithm implemented in the MatchCAD mathematical package in the form of a computer model for comparative evaluation and optimization of calculating the number of parts processed by machines of different types based on the limitations available in production. *Results.* The developed technique made it possible to create a calculation algorithm based on it. The implemented computer model in the MatchCAD mathematical package allows optimizing the values of the number of parts processed in each group, but with machines of different types, by alternately optimizing to minimize operating costs, to minimize energy consumption and to minimize labor costs. *Conclusions.* The found difference in values between the option of the minimum production cycle for the manufacture of a batch of parts and the display is stable.

Keywords: machine tools, technological operations, optimization of the technological process, load distribution of the site

For citation: Konovalov V.V., Dontsova M.V., Rasstegaev A.N., Zaitsev V.Yu. Optimization of loading of machines in production areas for parts manufacturing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):106–116. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-9

Введение

Оптимизация изготовления деталей широко используется в машиностроении, ее проводят с целью повышения качества и конкурентоспособности получаемой продукции и снижения издержек [1–3].

Оптимизации подвергается как конструкция изделий, так и технологические процессы производства. Первая направлена на увеличение надежности, прочности, снижение себестоимости, массы и затрат на материалы, а также улучшение эргономики и других характеристик деталей и изделий [4, 5]. При оптимизации конструкции детали часто используют метод топологической оптимизации. Топологическая оптимизация – это «метод инженерного анализа конструкции изделия, который применяется для оптимизации формы или структуры деталей с целью улучшения их эксплуатационных и функциональных характеристик» [6]. Топологическая оптимизация широко используется в аэрокосмической, автомобильной отраслях промышленности и других, где требуется получение легких и прочных конструкций.

Оптимизация технологических процессов включает в себя улучшение технологий производства, сокращение времени изготовления, оптимальную загрузку оборудования и снижение издержек [7–9]. Оптимизация технологических процессов заключается в поиске наиболее рационального способа производства изделия и использования ресурсов. Оптимизации подвергаются: маршрут обработки; производительность; основное и вспомогательное время изготовления деталей и сборки изделий; потери, возникающие при реализации технологии, и другие параметры [10–12]. К основным методам оптимизации технологических процессов можно отнести: внедрение принципов бережливого производства, реинжиниринг производственных процессов, применение математических методов [13, 14]. Для выбора метода оптимизации необходимо четко сформулировать целевые показатели, критерии, входные и выходные параметры, ограничения, а также сроки получения экономического эффекта [11, 14, 15].

В результате технологической оптимизации имеется возможность значительно повысить производительность, снизить издержки производства, повысить прибыль предприятия и конкурентоспособность продукции.

Целью исследования является разработка компьютерной модели оптимизации загрузки станков одной классификационной группы, но различного типа, имеющегося парка технологического оборудования предприятия.

Материалы и методика исследований

Исследования предусматривали разработку методики и алгоритма расчета, реализованных в математическом пакете MatchCAD в виде компьютерной модели сравнительной оценки и оптимизации расчета количества деталей, обрабатываемых станками одной классификационной группы, но различного типа, на основе имеющихся на производстве ограничений. Используя данные блока исходных значений показателей, производили в последующем расчет минимальной длительности работы станков одной группы при полной их загрузке.

Сравнение минимальных длительностей работы станков используемой группы, производили с заданным сроком исполнения заказа и обоснованием потребной минимальной длительности (контроль) выполнения заказа.

Осуществляли контроль производимого количества деталей по типам станков и их суммарное количество для всех станков участка при соблюдении заданной программы выпуска.

Производили расчет фактического фонда рабочего времени работы всех станков за допустимый период времени работы и количества деталей, выпускаемых типом станков за допустимый период времени.

Определяли потребные трудозатраты на выполнение производственной программы (заказа, партии), потребляемой мощности, расхода энергии, эксплуатационных затрат при условии одновременной работы всех станков группы, выполняющих заказ, т.е. при минимальном сроке выполнения заказа.

Устанавливали ограничения по количеству деталей, изготавливаемых станком каждой группы, выполняющих производственную программу (партию), в том числе за допустимый период работы, и типы станков, обеспечивающих выполнение заказа. Соответственно для типов станков, выполняющих один вид операций, рассчитывали: трудозатраты на выполнение производственной программы (партии), расход энергии, эксплуатационные затраты в случае выполнения потребного объема работ за допустимый период времени.

На основе распределения наряда по типам станков, осуществляющих выполнение конкретного вида операций на изготовление заданной программы выпуска деталей, проводили поочередную оптимизацию по минимуму эксплуатационных затрат, расходу энергии, трудозатрат на выполнение производственной программы (партии). Сравнивая производственную программу типов станков по вариантам оптимизации, находили наиболее приемлемый вариант.

Исходными данными для моделирования являются:

– производственное задание /партия/ (Z_v , шт. деталей);

– длительность допустимого периода работ /срок изготовления партии (D , сут.);

– сменность работы станков ($N_{ст}$, ч) и длительность смены ($D_{ст}$, ч);

– участки станков (i), объединенные по видам операций на станках, и численность ($Z_{i,j}$, шт.) станков по типам (j) на участках. Например:

$i = 1$ – токарные: $j = 1$ – универсальные, $j = 2$ – автоматы, $j = 3$ – с числовым программным управлением (ЧПУ);

$i = 2$ – фрезерные: $j = 1$ – горизонтальные, $j = 2$ – вертикальные, $j = 3$ – ЧПУ;

$i = 3$ – сверлильные: $j = 1$ – настольные, $j = 2$ – напольные, $j = 3$ – горизонтальные;

$i = 4$ – шлифовальные: $j = 1$ – наружно шлифовальные, $j = 2$ – внутришлифовальные, $j = 3$ – универсальные.

– установленная мощность привода станков (P_{ij} , кВт);

– стоимость эксплуатационных затрат станков каждого типа (Cr_{ij} , руб./ч), определяется предварительно на основании расчета технологического процесса и расчета себестоимости работ;

– трудозатраты выполнения технологических операций обработки детали на данном виде станков (Td_{ij} , мин/шт.), определяются предварительно на основании расчета технологического процесса изготовления детали по фактически имеющимся у станка подаче и частоте вращения шпинделя.

Результаты исследований

В процессе разработки математической модели оптимизации количества деталей, обрабатываемых на станках разных типов в составе одной технологической группы, была разработана методика, позволившая получить алгоритм расчета (рис. 1) и реализованная как компьютерная модель в математическом пакете MatchCAD.

Минимальная длительность (сут) работы производственного участка станков одной классификационной группы при полной загрузке оборудования определяется по выражению

$$T_{i,j} = \frac{Zv \cdot Td_{i,j} \cdot s_{i,j}}{60D_{ст} N_{ст} (Z_{i,j} + \min)}, \quad (1)$$

где $s_{i,j}$ – коэффициенты, уточняющие доли производительности участка по видам станков:

$$s_{i,j} = \frac{\frac{Z_{i,j}}{Td_{i,j} + \min}}{\sum_i \left(\frac{Z_{i,j}}{Td_{i,j} + \min} \right) + \min}. \quad (2)$$

При этом \min – параметр исключения ошибки при моделировании расчета в программе MatchCAD, $\min = 10^{-9}$.

Значения $T_{i,j}$ показывают минимальную длительность работы i -х участков при одновременной работе всех j -х станков.

Определяется фактически допустимый фонд рабочего времени (ч) всех станков конкретного типа за допустимый период работы:

$$Frv_{i,j} = D \cdot D_{ст} \cdot N_{ст} \cdot Z_{i,j}. \quad (3)$$

Производится контроль выполнимости задания в указанные сроки:

$$D \geq T_{i,j}. \quad (4)$$

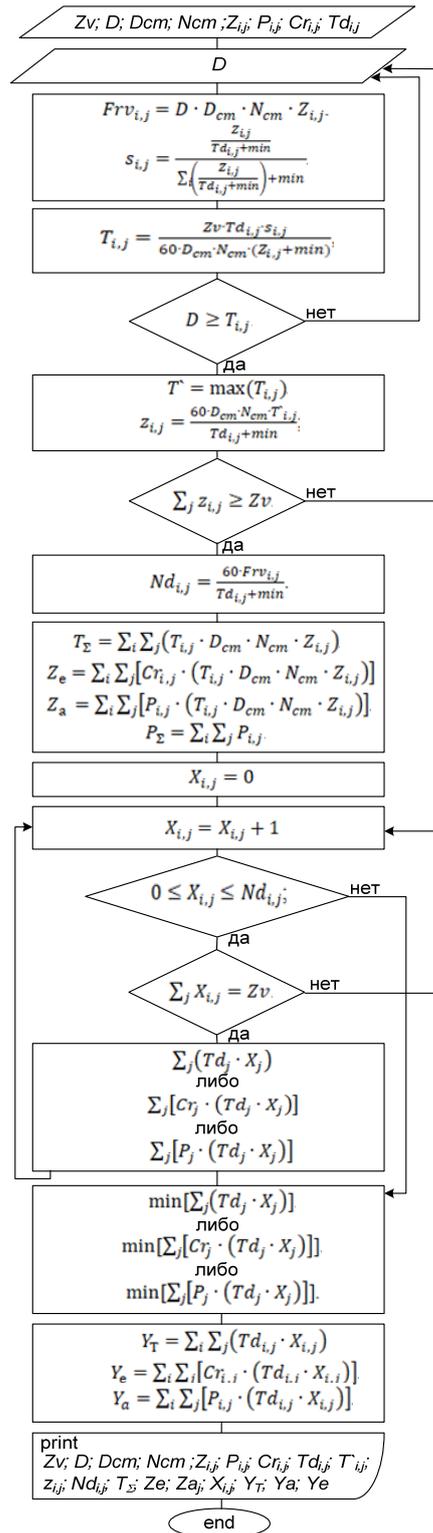


Рис. 1. Алгоритм оптимизации количества деталей $X_{i,j}$, обрабатываемых станками группы

При несоблюдении условия указанные в задании сроки невыполнимы и требуют корректировки.

При выполнении условия определяют максимальное значение $T_{i,j}$ для установления минимально возможного периода выполнения задания (T' , сут):

$$T' = \max(T_{i,j}). \quad (5)$$

В процессе определения ограничений модели уточняется возможное количество деталей, обрабатываемых каждым типом станков за время T' для контроля суммарного количества деталей, обрабатываемых всеми станками участка на соответствие заданию:

$$z_{i,j} = \frac{60D_{\text{ст}}N_{\text{ст}}T_{i,j}}{Td_{i,j} + \min}; \quad (6)$$

$$\sum_j z_{i,j} \geq Zv.$$

Максимальное количество деталей (шт.), которое возможно изготовить на станках каждого вида участка за фактически допустимый фонд рабочего времени:

$$Nd_{i,j} = \frac{60Frv_{i,j}}{Td_{i,j} + \min}. \quad (7)$$

Трудоемкость обработки (чел.ч) при выполнении производственной программы выпуска (заказа) с минимальным сроком выполнения заказа:

$$T_{\Sigma} = \sum_i \sum_j (T_{i,j} \cdot D_{\text{ст}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot Z_{i,j}). \quad (8)$$

Эксплуатационные затраты (руб.) при условии одновременной работы всех станков участка, выполняющих заказ, т.е. при минимальном сроке выполнения заказа/ партии:

$$Z_e = \sum_i \sum_j [Cr_{i,j} \cdot (T_{i,j} \cdot D_{\text{ст}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot Z_{i,j})]. \quad (9)$$

Затрачиваемая работа (кВт·ч) на выполнение производственной программы выпуска (заказа) при минимальном сроке производства:

$$Z_a = \sum_i \sum_j [P_{i,j} \cdot (T_{i,j} \cdot D_{\text{ст}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot Z_{i,j})]. \quad (10)$$

Потребляемая мощность (кВт) привода станков при минимальном сроке выполнения заказа:

$$R_{\Sigma} = \sum_i \sum_j P_{i,j}. \quad (11)$$

Количество деталей, обрабатываемых станками каждого вида участка ($X_{i,j}$, шт.) в процессе оптимизации определяются условиями (ограничениями):

$$0 \leq X_{i,j} \leq Nd_{i,j}; \quad (12)$$

$$\sum_j X_{i,j} = Zv.$$

При использовании обрабатывающих центров с ЧПУ, которые включают в себя дополнительные функции – наличие дополнительного шпинделя с приводом, возможность работы в трех, четырех координатных осях, дополнительно вводится ограничение:

$$X_{2,3} = X_{3,3} = X_{1,3}. \quad (13)$$

В процессе оптимизации записываются целевые функции для каждого i -го участка, по которым осуществляется поиск минимального количества затрат на основе расчета числовых значений количества обрабатываемых деталей станками каждого участка конкретных типов (X_j):

– для трудозатрат:

$$\sum_j (Td_j \cdot X_j) = \min; \quad (14)$$

– для эксплуатационных затрат:

$$\sum_j [Cr_j \cdot (Td_j \cdot X_j)] = \min; \quad (15)$$

– для энергетических затрат:

$$\sum_j [P_j \cdot (Td_j \cdot X_j)] = \min. \quad (16)$$

После оптимизации количества деталей X_j по всем участкам основные сравниваемые показатели вариантов оптимизации для допустимого срока выполнения заказа определяются по следующим выражениям:

• Потребные трудозатраты (чел.ч) на выполнение производственной программы (партии, заказа) при допустимом сроке выполнения заказа:

$$Y_T = \sum_i \sum_j (Td_{i,j} \cdot X_{i,j}). \quad (17)$$

• Эксплуатационные затраты (руб.) при условии одновременной работы всех станков участка, выполняющих заказ, т.е. при допустимом сроке выполнения заказа:

$$Y_e = \sum_i \sum_j [Cr_{i,j} \cdot (Td_{i,j} \cdot X_{i,j})]. \quad (18)$$

• Затрачиваемая работа (кВт·ч) на выполнение производственной программы (заказа) при допустимом сроке выполнения заказа:

$$Y_a = \sum_i \sum_j \left[P_{i,j} \cdot (Td_{i,j} \cdot X_{i,j}) \right]. \quad (19)$$

При этом реализованная компьютерная модель (см. рис. 1) в математическом пакете MatchCAD производит оптимизацию значений количества деталей, обрабатываемых станками разных типов, усовершенствована путем поочередной оптимизации по минимуму эксплуатационных затрат, по минимуму энергозатрат и по минимуму трудозатрат.

Найденная разница значений между вариантом минимального срока выполнения заказа и показателями после разных вариантов оптимизации позволяет сопоставить результаты различных способов загрузки оборудования для наиболее эффективного его использования. На основе сравнения производственной программы типов станков по вариантам оптимизации находится наиболее приемлемый вариант производственной программы.

Заключение

Разработанная методика позволила составить на ее основе алгоритм расчета. Реализованная компьютерная модель в математическом пакете MatchCAD позволяет производить оптимизацию значений количества деталей, обрабатываемых в каждой группе, но станками разных типов, путем поочередной оптимизации по минимуму эксплуатационных затрат, по минимуму энергозатрат и по минимуму трудозатрат. Найденная разница значений между вариантом минимального производственного цикла изготовления партии деталей и показателями после разных вариантов оптимизации позволяет сопоставить результаты различных способов загрузки оборудования для наиболее эффективного его использования. Сравнение производственной программы типов станков по разным вариантам оптимизации дает возможность найти наиболее приемлемый вариант производственной программы реализации технического задания (заказа, партии).

Список литературы

1. Кабалдин Ю. Г., Шатагин Д. А., Аносов М. С., Кузьмишина А. М. Интеллектуальное управление технологическими системами в условиях цифрового производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 1 (718). С. 3–12.
2. Горобец И. А. Определение критерия оптимизации системы управления токарных станков с ЧПУ // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2019. № 4 (67). С. 19–24.
3. Сидорова А. В., Пономарев Б. Б. Определение оптимального сочетания параметров управления промышленным роботом в робототехническом комплексе обработки кромок деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23, № 4 (147). С. 723–730.
4. Морозов А. С., Морозов С. А., Щенятский А. В. Параметрическая оптимизация процесса торцевой раскатки детали класса «Цилиндрическая с фланцем» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 425–433.

5. Андриюшкин А. Ю., Буцикин Е. Б., Ли Ч. Технологические подходы при проектировании топологически оптимизированных деталей // *Аэрокосмическая техника и технологии*. 2023. Т. 1, № 3. С. 102–114.
6. Клепцов А. А., Клепцова Л. Н. Методика параметрической оптимизации технологических процессов при обеспечении характеристик поверхностного слоя деталей // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020. № 4 (140). С. 9–17.
7. Безъязычный В. Ф., Терехова А. С., Киселёв Э. В. Автоматизированный способ решения задачи выбора оптимальной технологии изготовления детали в рамках ресурсной базы конкретного производственного подразделения // *Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева*. 2020. № 3 (54). С. 43–47.
8. Оковитый В. А., Пантелеев Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методом плазменного напыления на воздухе // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 5. С. 369–374.
9. Тараховский А. Ю., Богуцкий В. Б. К вопросу о подходе к оптимизации операций при обработке деталей на станках с ЧПУ // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2021. № 7. С. 19–21.
10. Анцев А. В., Пасько Н. И. Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15, № 4. С. 102–110.
11. Павлова А. Н., Кузнецова О. В. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 1 (65). С. 78–87.
12. Полетаева Е. В., Горлов И. В. Оптимизация структуры производственной системы в условиях многономенклатурного машиностроительного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2022. № 2 (14). С. 77–82.
13. Школина Д. И., Ададунов А. С., Бехер С. А. Оптимизация ресурсов распределённых производственных процессов с использованием имитационного моделирования // *Мир транспорта*. 2022. Т. 20, № 6 (103). С. 56–63.
14. Абрамян В. Повышение технологичности выпускаемой продукции как ключевое направление снижения уровня затрат и роста эффективности машиностроительного производства // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2018. № 54 (2). С. 8–14.
15. Liu J., Wen, X., Zhou H., Sheng S., Zhao P. L., Xiaojun K., Chao, Chen Y Digital twin-enabled machining process modeling // *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 54 (6). P. 101737. doi: 10.1016/j.aei.2022.101737

References

1. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuz'mishina A.M. Intelligent control of technological systems in the context of digital production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = University proceedings. Mechanical engineering*. 2020;(1):3–12. (In Russ.)
2. Gorobets I.A. Definition of the optimization criterion for the control system of CNC lathes. *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive technologies and mechanical engineering systems*. 2019;(4):19–24. (In Russ.)
3. Sidorova A.V., Ponomarev B.B. Determination of the optimal combination of industrial robot control parameters in a robotic complex for edge processing of parts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):723–730. (In Russ.)
4. Morozov A.S., Morozov S.A., Shchenyatskiy A.V. Parametric optimization of the end rolling process of a part of the class “Cylindrical with flange”. *Izvestiya Tul'skogo gosudu-*

- darstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Engineering sciences. 2020;(4):425–433. (In Russ.)*
5. Andryushkin A.Yu., Butsikin E.B., Li Ch. Technological approaches in the design of topologically optimized parts. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii = Aerospace engineering and technology. 2023;1(3):102–114. (In Russ.)*
 6. Kleptsov A.A., Kleptsova L.N. Methodology of parametric optimization of technological processes in ensuring the characteristics of the surface layer of parts. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2020;(4):9–17. (In Russ.)*
 7. Bez'yazychnyy V.F., Terekhova A.S., Kiselev E.V. An automated method for solving the problem of selecting the optimal technology for manufacturing a part within the resource base of a specific production division. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solov'eva = Bulletin of RSATU named after P/A/ Solovyov. 2020;(3):43–47. (In Russ.)*
 8. Okovityy V.A., Panteleenko F.I., Okovityy V.V., Astashinskiy V.M. Optimization of the process of applying coatings from metal-ceramic powders by the method of plasma spraying in air. *Nauka i tekhnika = Science and technology. 2021;20(5):369–374. (In Russ.)*
 9. Tarakhovskiy A.Yu., Bogutskiy V.B. On the issue of the approach to optimization of operations during processing of parts on CNC machines. *Mekhatronika, avtomatika i roboto-tekhnika = Mechatronics, automation and robotics. 2021;(7):19–21. (In Russ.)*
 10. Antsev A.V., Pas'ko N.I. Optimization of cutting speed and tool change period in statistical adaptation mode. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2019;15(4):102–110. (In Russ.)*
 11. Pavlova A.N., Kuznetsova O.V. Mathematical modeling and optimization of technological processes. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern science-intensive technologies. Regional application. 2021;(1):78–87. (In Russ.)*
 12. Poletaeva E.V., Gorlov I.V. Optimization of the structure of the production system in the conditions of multi-product mechanical engineering production. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tver State Technical University. Series: Engineering sciences. 2022;(2):77–82. (In Russ.)*
 13. Shkolina D.I., Adadurov A.S., Bekher S.A. Optimization of distributed manufacturing process resources using simulation modeling. *Mir transporta = World of transport. 2022;20(6):56–63. (In Russ.)*
 14. Abramyan V. Improving the technological efficiency of manufactured products as a key direction for reducing costs and increasing the efficiency of mechanical engineering production. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern science-intensive technologies. Regional application. 2018;(54):8–14. (In Russ.)*
 15. Liu J., Wen, X., Zhou H., Sheng S., Zhao P.L., Xiaojun K., Chao, Chen Y Digital twin-enabled machining process modeling. *Advanced Engineering Informatics. 2022;(54):101737. doi: 10.1016/j.aei.2022.101737*

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Викторович Коновалов
 доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры технологии
 машиностроения, Пензенский
 государственный технологический
 университет (Россия, г. Пенза,
 пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
 E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

Vladimir V. Konovalov
 Doctor of engineering sciences, professor,
 professor of the sub-department
 of mechanical engineering technology,
 Penza State Technological University
 (1a/11 Baydukova passage / Gagarina
 street, Penza, Russia)

Марина Владимировна Донцова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: dontmv@mail.ru

Marina V. Dontsova

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Александр Николаевич Расстегаев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: ran-tms@yandex.ru

Aleksandr N. Rasstegaev

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

Владимир Юрьевич Зайцев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: vluzai@gmail.com

Vladimir Yu. Zaitsev

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technology, Penza State
Technological University (1a/11 Baydukova
passage / Gagarina street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 15.01.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.02.2025

Принята к публикации / Accepted 03.03.2025

УДК 621.923

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-10

Распределение припуска в зоне обработки на операциях проходного бесцентрового шлифования

П. В. Малинин¹, П. Ю. Бочкарев², И. И. Артемов³

^{1,2}Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

²Саратовский государственный университет генетики,

биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение метода бесцентрового шлифования, несмотря на его высокую эффективность, сопряжено с определенными трудностями, обусловленными отсутствием четко сформулированной и нормативно закреплённой методологии проектирования и реализации операционных технологий. *Материалы и методы.* Исследования, проведенные на основе теоретических и практических обоснований, разработанных моделей технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования, научно подтверждают необходимость тщательного анализа условий и ограничений, присущих данному методу обработки, при определении величин припусков. Проектные процедуры, связанные с определением величины припуска, требуют расширения традиционного информационного обеспечения, а также корректировки и дополнения известных методик в ходе разработки технологии. Разработанные зависимости, связывающие параметры настройки с характеристиками рабочей зоны и реальным состоянием технологической системы, позволяют провести такой анализ во всех сечениях зоны обработки. *Результаты.* Выявлены причинно-следственные связи, которые определяют, как величина припуска влияет на динамику обработки в разных частях рабочей зоны. На основе этих связей были созданы методические, алгоритмические и программные инструменты для определения припуска как части технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования. *Выводы.* Интегральный подход к рассмотрению этой проблемы служит основой для создания комплексной системы проектирования, которая включает в себя все этапы разработки и управления технологическими процессами бесцентрового шлифования, а также их автоматизацию.

Ключевые слова: технологическая подготовка механообрабатывающих производств, проходное бесцентровое шлифование, припуск на механическую обработку, условие силового замыкания, наладка оборудования, режимы обработки

Для цитирования: Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И. Распределение припуска в зоне обработки на операциях проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 117–131. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-10

Allocation of allowances in the processing area for operations continuous centerless grinding

P.V. Malinin¹, P.Yu. Bochkarev², I.I. Artemov³

^{1,2}Kamyshin Technological Institute, branch of
Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia
²Saratov State University of Genetics, Biotechnology
and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
³Penza State University, Penza, Russia
¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The application of the centerless grinding method, despite its high efficiency, is fraught with certain difficulties due to the lack of a clearly formulated and normatively fixed methodology for designing and implementing operational technologies. *Materials and methods.* Research conducted on the basis of theoretical and practical justifications, developed models of technological preparation of through-hole centerless grinding operations, scientifically confirm the need for a thorough analysis of the conditions and limitations inherent in this processing method when determining the values of allowances. Design procedures related to the determination of the tolerance value require the expansion of traditional information support, as well as adjustments and additions to well-known techniques during technology development. The developed dependencies linking the settings with the characteristics of the working area and the actual state of the technological system allow such an analysis to be carried out in all sections of the processing area. *Results.* Causal relationships have been identified that determine how the amount of the allowance affects the dynamics of processing in different parts of the work area. Based on these connections, methodological, algorithmic and software tools were created to determine the allowance as part of the technological preparation of through-centerless grinding operations. *Conclusions.* Causal relationships have been identified that determine how the amount of the allowance affects the dynamics of processing in different parts of the work area. Based on these connections, methodological, algorithmic and software tools were created to determine the allowance as part of the technological preparation of through-centerless grinding operations.

Keywords: technological preparation of machining industries, continuous centerless grinding, allowance for machining, power circuit condition, equipment adjustment, processing modes

For citation: Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I. Allocation of allowances in the processing area for operations continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):117–131. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-10

Введение

Обработка открытых цилиндрических поверхностей как конструктивных элементов деталей типа тел вращения с использованием проходного бесцентрового шлифования представляет собой эффективный и высокоточный процесс [1–3]. Однако применение этого метода в различных отраслях промышленности затруднено из-за отсутствия четко определенной и нормативно регламентируемой методологии проектирования и реализации операционных технологических процессов.

Эксплуатация существующих и создание новых современных производств, основанных на применении бесцентрового продольного шлифования, обладающих расширенными функциональными возможностями, не представляется возможным без устранения существующих ограничений, связанных с вопросами настройки оборудования и управления производственными процессами. Необходимость разработки научно обоснованного подхода и серьезного усовершенствования методических принципов технологической

подготовки [4–6] с акцентом на минимизацию субъективного фактора при выполнении проектных и наладочных работ является насущной потребностью. В связи с этим необходим детальный анализ всех особенностей различных вариантов обработки методом проходного бесцентрового шлифования, которые различаются по условиям реализации и выполнения формализованного описания взаимосвязанных функциональных действий в течение выполнения процесса обработки.

Выполненная структурная классификация методов продольного бесцентрового шлифования [7, 8], включающая группирование процедур отдельных этапов технологического обеспечения на основе критерия однородности проектных процедур, позволила сформировать требования к необходимому информационному обеспечению и создать структурную внутригрупповую унификацию технологической подготовки операций. Результаты кластерного анализа способов обработки, полученные в ходе исследования, а также анализ существующих теоретических работ и сложившейся практики их применения в производственных процессах, подтвержденный проведенными авторами исследованиями [9, 10], указывают на необходимость разработки комплексных решений, которые могут стать основой для автоматизации всего цикла создания и реализации технологических операций проходного бесцентрового шлифования.

Материалы и методы

Ключевым аспектом проведения подобных исследований становится детальный анализ и описание сложных взаимодействий между элементами технологической системы и обрабатываемой деталью на всех этапах процесса обработки в рабочей зоне. При определении технологических режимов необходимо учитывать не только пространственные связи в местах обработки и контактов, но и силовые взаимодействия между этими элементами. Одним из определяющих факторов, влияющих на учет этих взаимосвязей, является величина припуска, назначаемого на технологический переход, а также его распределение в процессе обработки в различных областях сечений рабочей зоны.

Механизм распределения величины снимаемого в рамках одного перехода припуска в зоне обработки для операций бесцентрового шлифования имеет принципиальное отличие от других методов обработки. Динамично изменяющиеся размер обрабатываемой поверхности и места ее контакта с элементами технологической оснастки являются следствием изменения относительного позиционирования детали в координатной системе станка. Данный фактор, кроме чисто геометрического обоснования непостоянства величины припуска, является предпосылкой изменения возникающих в процессе обработки сил. Происходит постоянное перестроение силовой схемы контактов как по их направлению, так и величинам, что выступает причиной изменения интенсивности взаимодействия абразивного круга с обрабатываемой поверхностью. Приведенные обоснования подтверждают сложный характер разделения общего припуска технологического перехода по зонам обработки при выполнении операций бесцентрового шлифования.

Подкреплением теоретических выводов являются исследования практического плана, базирующихся на результатах изучения опыта наладчиков оборудования. Подтверждена неравномерность износа абразивных кругов по длине обработки в условиях серийного производства, что является следстви-

ем неравномерности распределения припуска в различных сечениях рабочей зоны обработки.

Разработка модели для определения распределения припуска в зоне обработки требует наличия дополнительной информации по сравнению с традиционными методами. Эти данные формируются на основе методик, описанных авторами в работах [11, 12]. На примере изготовления деталей на станках модели Sasl 200*500 в условиях производства АО «ЕПК Саратов» (подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520–2011), представлены графики результатов расчетов, которые подтверждают динамический характер изменения составляющих параметров и возможность их учета.

Влияние реальных размерных характеристик шлифовального и ведущего кругов, действительного размера заготовки обрабатываемой поверхности на установление расчетных наладочных параметров представлены на рис. 1, 2.

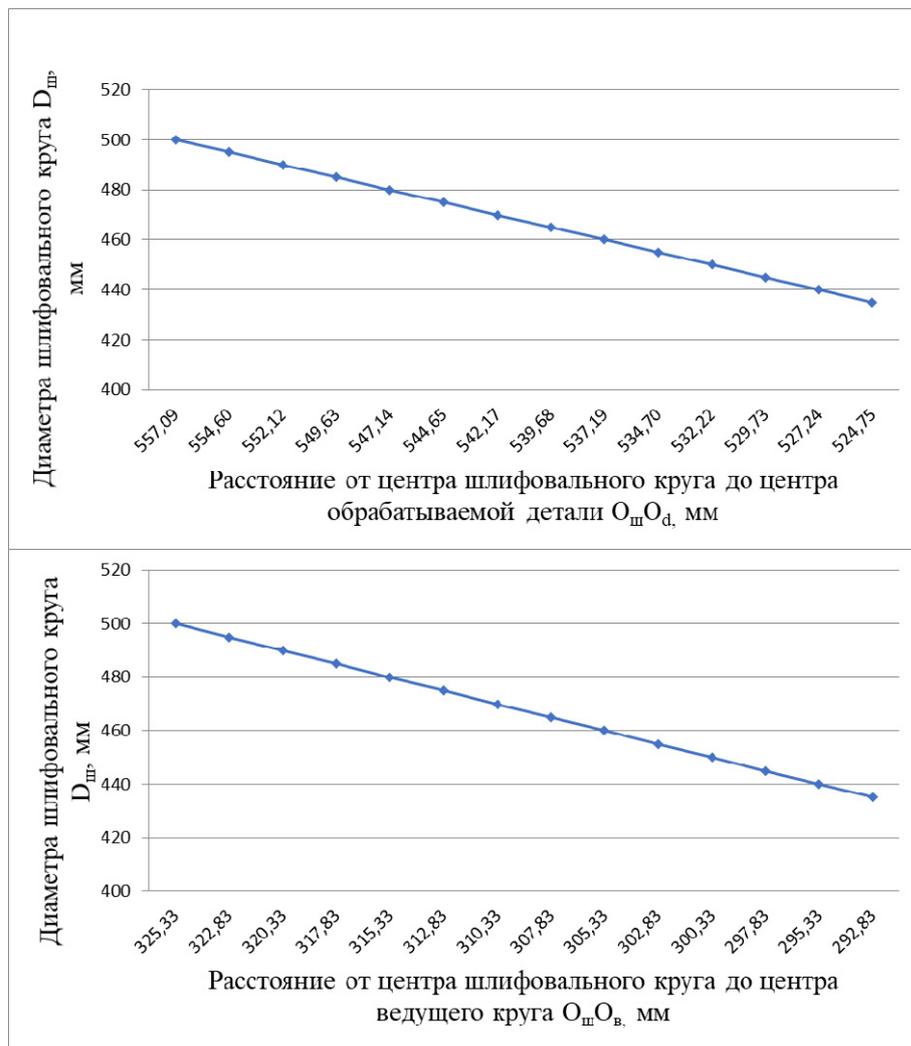


Рис. 1. Влияние изменения реального диаметра шлифовального круга $D_{ш}$ в допустимом диапазоне значений на величины расстояний: от центра шлифовального круга до центров обрабатываемой детали $O_{ш}O_d$ и ведущего круга $O_{ш}O_b$

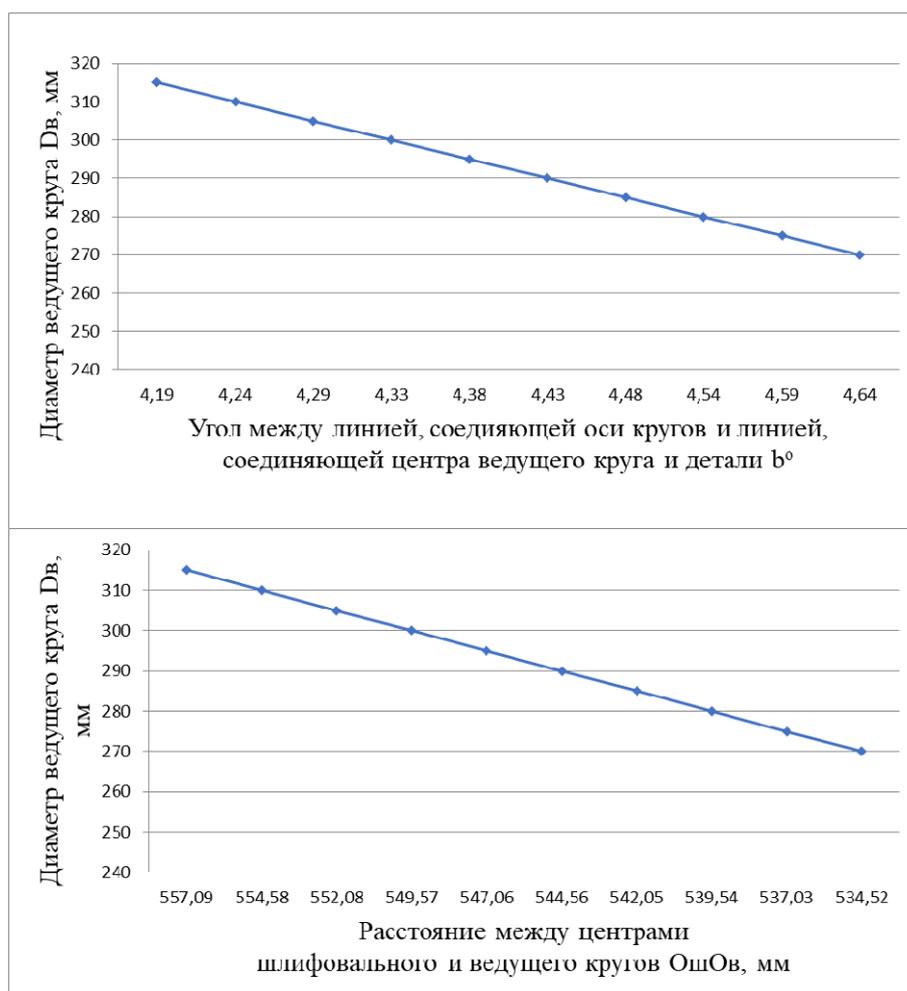


Рис. 2. Влияние изменения реального диаметра ведущего круга D_v в допустимом диапазоне значений на величины угла между линиями, соединяющими оси кругов, и центров ведущего круга и обрабатываемой детали b^0 ; расстояния от центра шлифовального круга до центра ведущего круга $O_{ш}O_v$

Полученные результаты демонстрируют, что уже на этапе настройки оборудования, когда оси шлифовального и ведущего кругов расположены на одной горизонтальной линии, реальные размеры кругов в установленных технологических пределах оказывают значительное влияние на ориентацию детали в пространстве и расположение мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы. Эти факторы напрямую связаны с выполнением требования силового замыкания и, соответственно, назначением величины припуска.

Другой группой факторов, которые необходимо учитывать при назначении величины припуска, являются изменения взаимосвязанных параметров реализации технологической операции проходного шлифования в различных сечениях рабочей зоны, обусловленных наклоном ведущего круга в вертикальном сечении и размерными характеристиками самой рабочей зоны. Результаты выполненного анализа изменения расстояний между центрами

шлифовального и ведущего кругов $O_{ш}O_{вi}$, центром обрабатываемой детали и точкой пересечения с опорной плоскостью установочного ножа в вертикальной плоскости $O_{дi}Q_i$, в сечениях, отстоящих от сечения, в котором производилась наладка станка в горизонтальной плоскости (L_i), представлены на рис. 3.

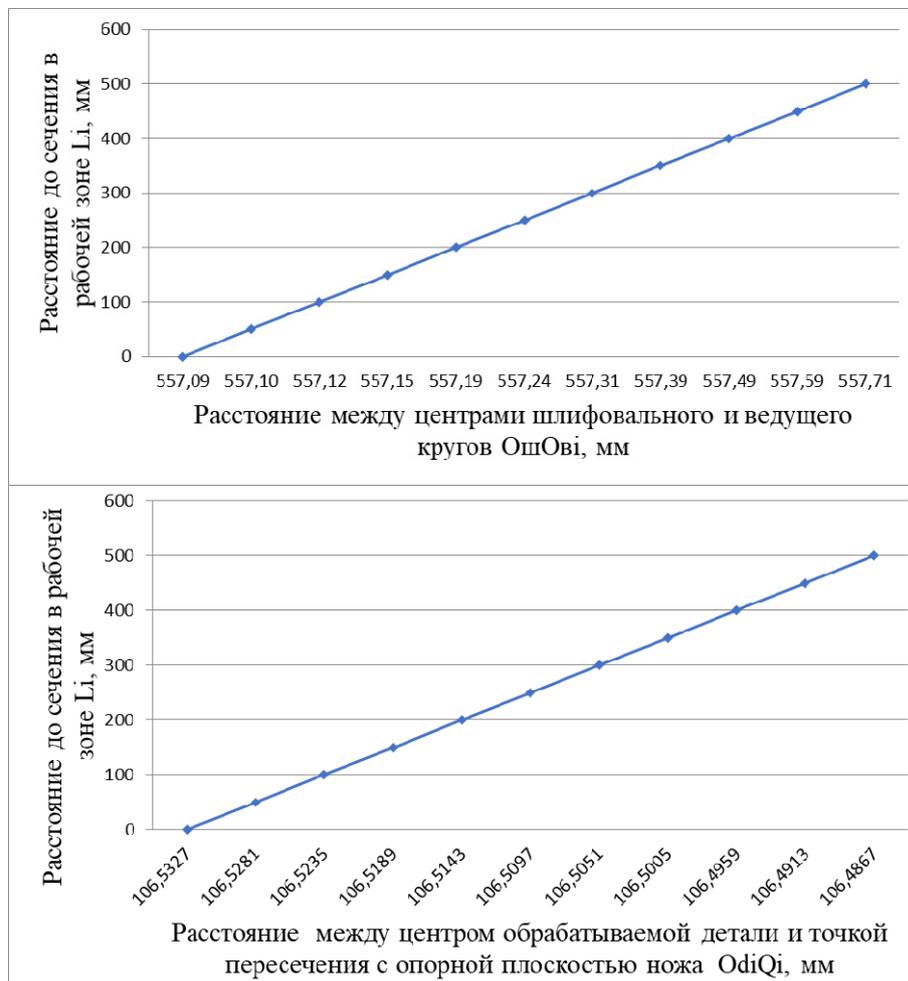


Рис. 3. Изменение в сечениях рабочей зоны (i) расстояний между: центрами шлифовального и ведущего кругов $O_{ш}O_{вi}$; центром обрабатываемой детали и точкой пересечения с опорной плоскостью установочного ножа в вертикальной плоскости $O_{дi}Q_i$

Координаты мест контактов обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки определялись с использованием моделей [13], позволяющих учитывать реальные размеры кругов, рабочей зоны и заготовки (А – со шлифовальным кругом, В – с ведущим кругом, Р – с опорной установочной поверхностью) рис. 4–6.

Характерной чертой метода проходного бесцентрового шлифования, которую необходимо учитывать при разработке проектных процедур, связанных с определением припусков, является непостоянное положение центра оси обрабатываемой поверхности в различных сечениях рабочей зоны отно-

сительно фиксированных координат элементов станка. На положение центра оси влияют как жесткость самой технологической системы, так и особенности схемы метода обработки. На рис. 7 представлены изменения в сечениях рабочей зоны (i) координат центра обрабатываемой поверхности.

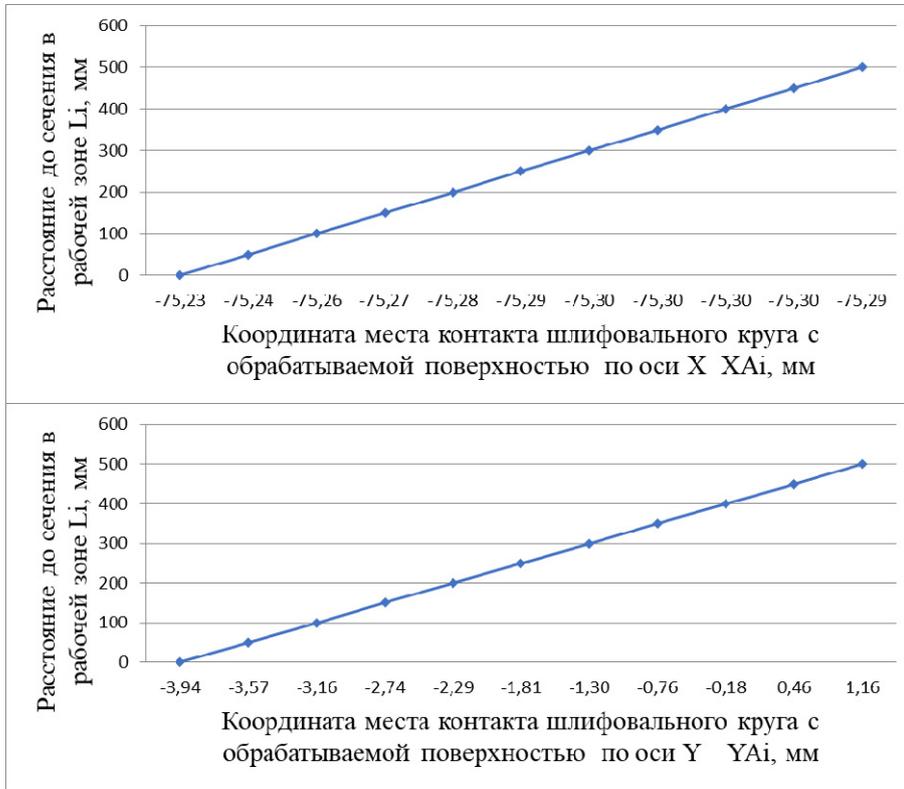


Рис. 4. Изменение в сечениях рабочей зоны (i) координат мест контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью

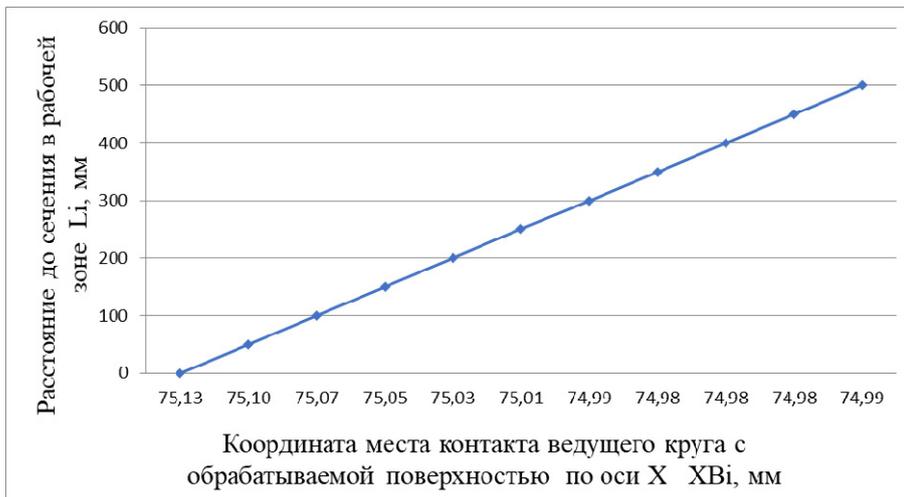


Рис. 5. Изменение в сечениях рабочей зоны (i) координат мест контакта ведущего круга с обрабатываемой поверхностью (начало)

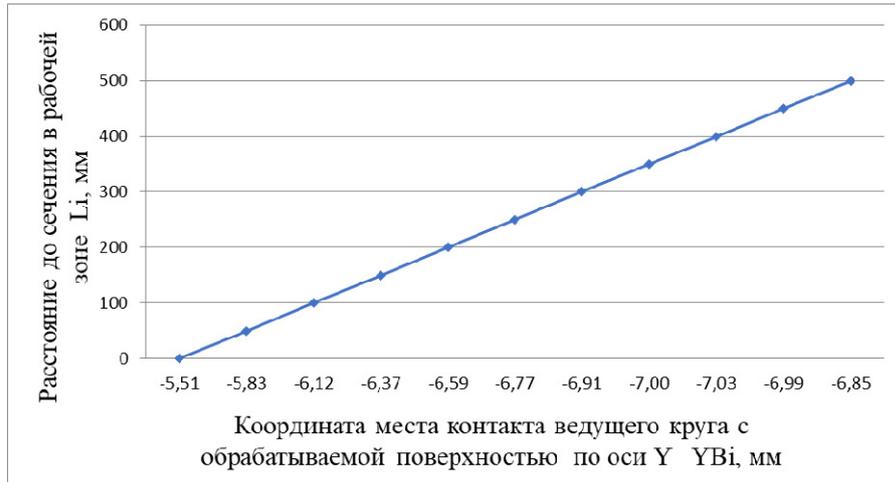


Рис. 5. Окончание

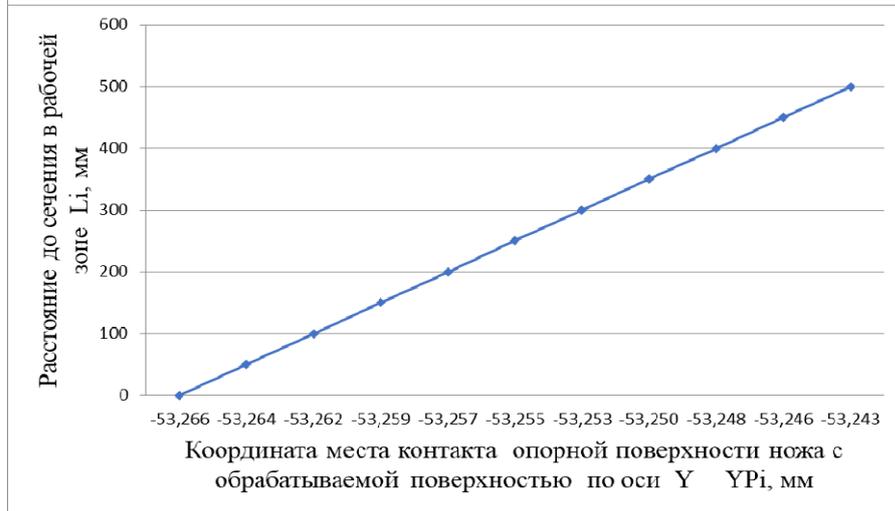
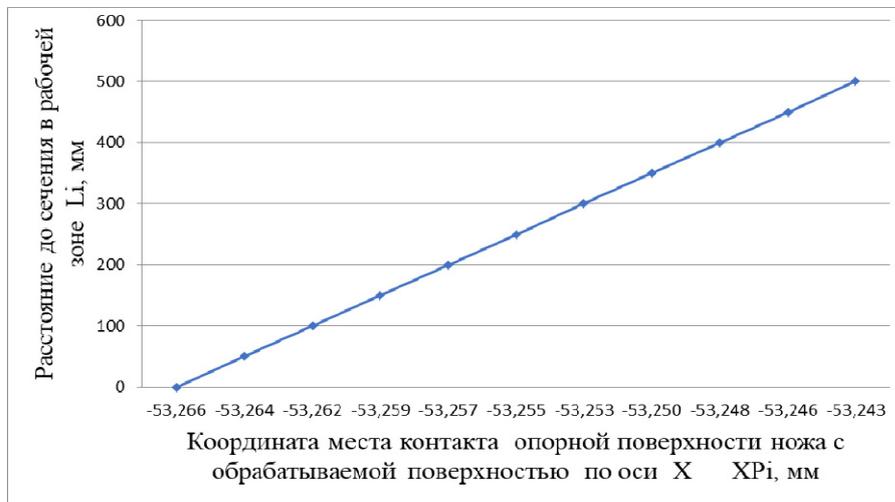


Рис. 6. Изменение в сечениях рабочей зоны (i) координат мест контакта обрабатываемой поверхности с опорной плоскостью установочного ножа

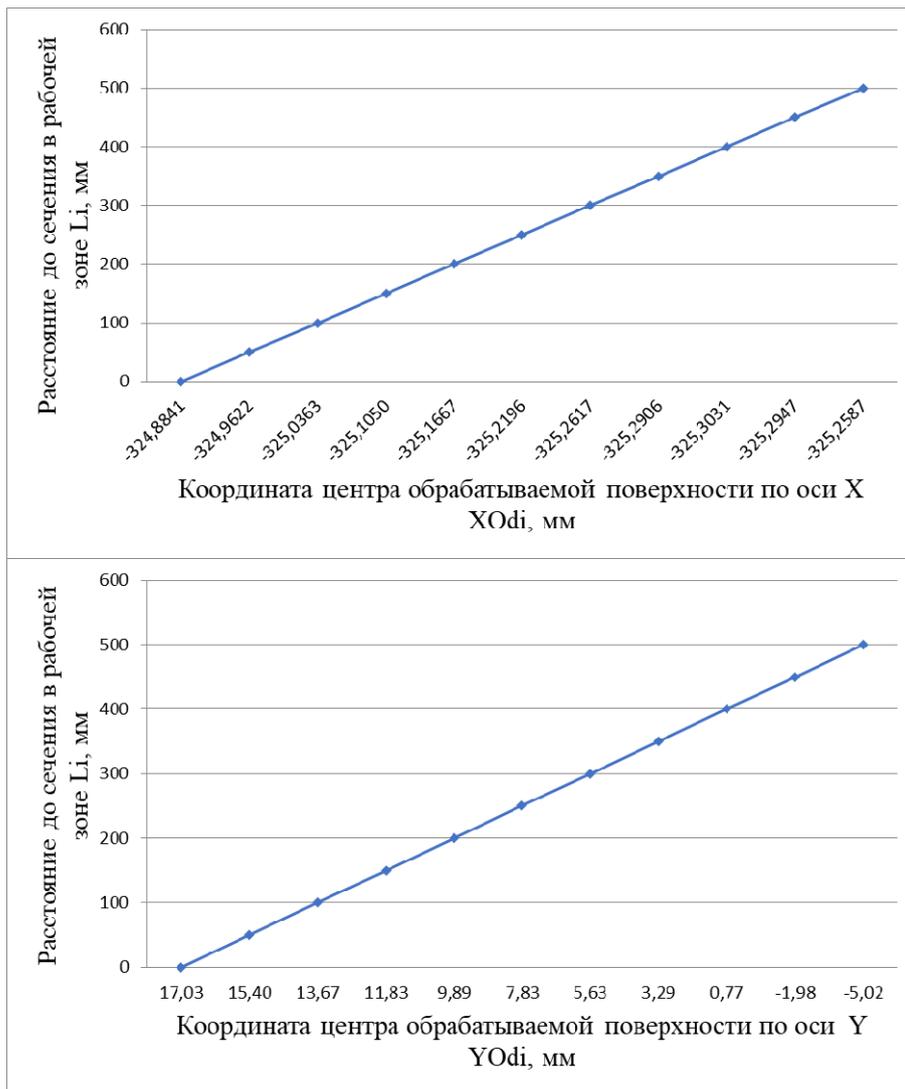


Рис. 7. Изменение в сечениях рабочей зоны (i) координат центра обрабатываемой поверхности

Таким образом, при продольном бесцентровом шлифовании припуск, как один из параметров, определяющих режимы резания, оказывает специфическое влияние, что требует разработки дополнительных проектных процедур при технологической подготовке операций.

Наклон ведущего круга в вертикальной плоскости является причиной образования мест контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом в рабочей зоне обработки в форме однополостного гиперболоида. При расположении горловины гиперболоида в сечении рабочей зоны в плоскости, проходящей через центры кругов параллельно оси детали, одновременно являющейся плоскостью, в которой выполняется наладка технологической операции, координаты и параметры кривой контактов определялись на базе известных зависимостей [14, 15]:

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1,$$

где y – координата вдоль горизонтальной оси зоны обработки; x – координата вдоль вертикальной оси зоны обработки; $a = \frac{D_B}{2 \sin \alpha}$; $b = \frac{D_B}{2}$; D_B – реальный диаметр ведущего круга (мм); α° – угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости.

В i -м сечении зоны обработки $\Delta_i D_B = \frac{D_B}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_B^2 - L_i^2 (\operatorname{tg} \alpha)^2}$, L_i – расстояние от сечения наладки до i -го сечения рабочей зоны (мм).

Наиболее объективным параметром, отражающим взаимосвязь между размером обрабатываемой поверхности и размерными характеристиками элементов технологического оборудования во всем пространстве рабочей зоны, является расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов. Установление зависимости между этим параметром и величиной припуска в сечениях зоны обработки выполнено в следующем виде:

$$M_i^2 = M^2 + \left(\frac{L_i}{\cos \alpha} \sin \alpha \right)^2; L_i \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{M_i^2 - M^2}; L_i = \frac{\sqrt{M_i^2 - M^2}}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где M_i – расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов в i -м сечении рабочей зоны (мм); M – расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов в сечении наладки (мм);

$$\frac{\partial t_i}{\partial L_i} = \frac{d_3 - d_d}{L};$$

$$\int_0^{t_i} dt = \int_0^{L_i} \frac{d_3 - d_i}{L} dl; \int_{t_{i-1}}^{t_i} dt = \int_{L_{i-1}}^{L_i} \frac{d_{i-1} - d_i}{L} dl,$$

здесь L – общая длина рабочей зоны обработки (высота шлифовального круга) (мм); d_3 – диаметр заготовки обрабатываемой поверхности (перед выполнением перехода) (мм); d_d – диаметр обработанной поверхности (после выполнения перехода) (мм); t_i – величина припуска в i -м сечении рабочей зоны (мм).

Полученные выражения позволяют наряду с установлением величины припуска в конкретном сечении рассчитать объем припуска, удаленного при обработке детали от начала процесса шлифования до этого сечения или между сечениями в рабочей зоне, что обеспечивает получение исходных данных для расчета действующих в местах контакта сил и выбора режимов обработки.

Назначение величины припуска и ее распределение в зоне обработки на протяжении всего выполнения технологического перехода не могут ограничиваться только приведенными выше условиями [16]. В отличие от других методов механической обработки цилиндрических поверхностей, кроме основополагающего принципа учета технологической наследственности, при

проходном бесцентровом шлифовании необходимо учитывать ряд других важных факторов: возможность перемещения детали даже в рамках одного оборота при снятии припуска с определенной части поверхности; непостоянство глубины резания; влияние припуска на выполнение требования силового замыкания [17]. Таким образом, изменение величины припуска разнонаправлено влияет на перечисленные обстоятельства и расчет припуска необходимо вести комплексно с учетом всех факторов.

На рис. 8 представлена общая блок-схема расчета составляющих припуска в рабочей зоне обработки, учитывающая все перечисленные особенности технологической подготовки операции проходного бесцентрового шлифования. Применяя итерационный подход, можно проанализировать сгенерированные сочетания наладочных параметров с учетом реальных размеров шлифовального и ведущего кругов, а также вариантов назначения величины припуска.

Методическое содержание последовательности выполнения расчета составляющих припуска в рабочей зоне обработки предоставляет возможность, регулируя назначением количества сечений, учитывать такую размерную характеристику обрабатываемой поверхности, как ее длина, и ее влияние на относительную ориентацию детали на протяжении всего процесса обработки.

Результаты

Проведенные исследования, основанные на представленных теоретических и практических обоснованиях, а также ранее разработанных моделях технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования, убедительно демонстрируют необходимость анализа условий и ограничений, специфичных для данного метода обработки, при назначении величин припусков. Разработанные зависимости, связывающие наладочные параметры с размерами рабочей зоны и реальным состоянием технологической системы, позволяют проводить такой анализ во всех сечениях зоны обработки.

Заключение

Реализация процедуры проектирования, связанной с определением величины припуска, как одного из ключевых параметров режимов обработки при выполнении операций проходного бесцентрового шлифования, требует тщательного анализа и учета множества факторов. Необходимо обеспечить заданные качественные характеристики обрабатываемой поверхности, опираясь на принципы управления технологической наследственностью. Кроме того, следует принимать во внимание влияние компоновочных решений станочного оборудования на степень жесткости системы. Для успешного выполнения этих задач требуется расширение информационного обеспечения, а также корректировка и дополнение в принятии отдельных решений в процессе разработки технологии.

Сформулированы причинно-следственные связи, определяющие влияние величины припуска на динамический характер обработки на различных участках рабочей зоны при выполнении данного вида обработки. На основе этих связей разработаны методическое, алгоритмическое и программное обеспечение для определения припуска как этапа технологической подготовки операции.

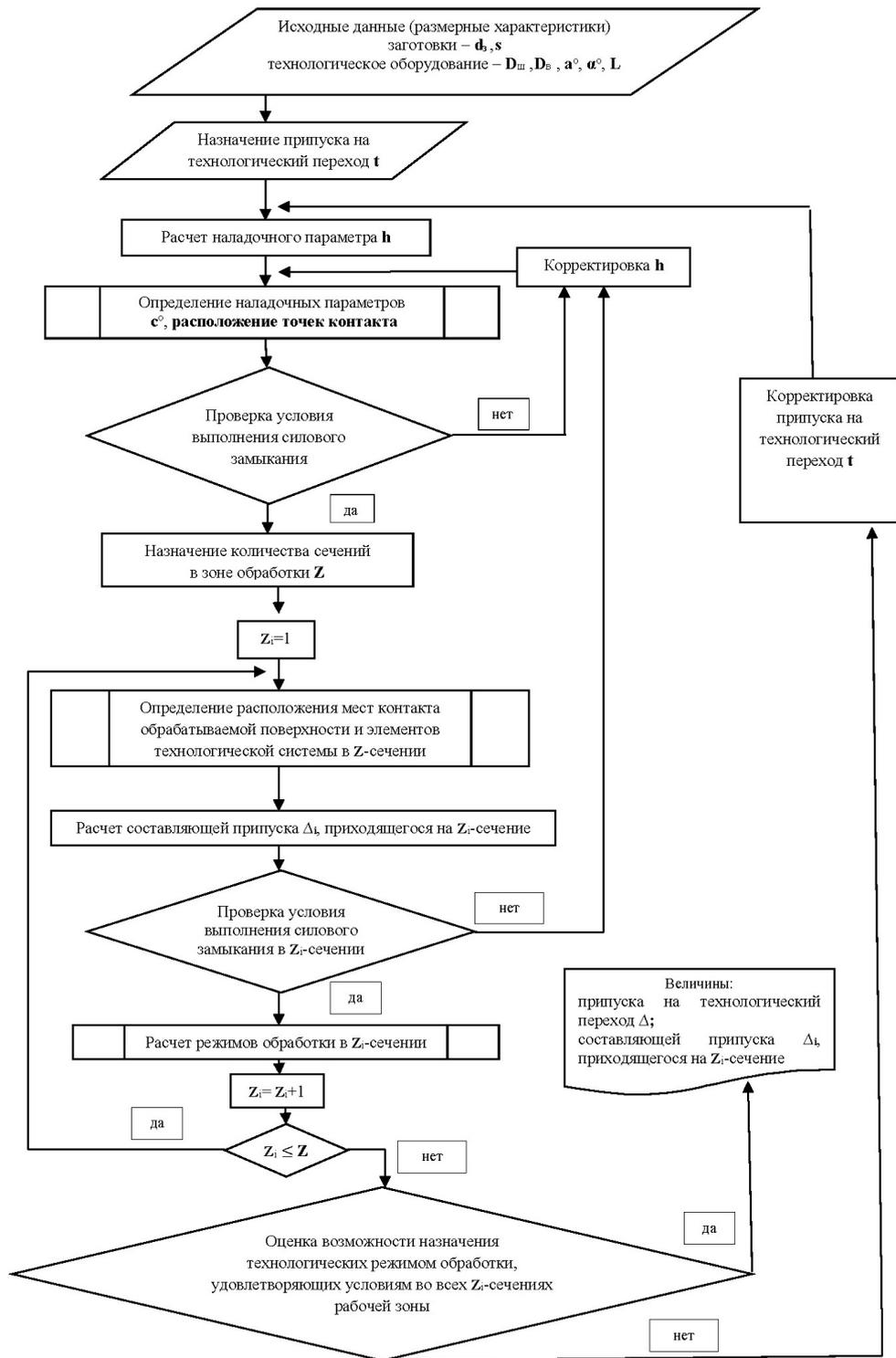


Рис. 8. Блок-схема расчета составляющих припуска в рабочей зоне обработки

Итерационный подход к созданию модели позволил генерировать варианты наладочных параметров с учетом реального состояния оборудования и

средств технологического оснащения, а также взаимного пространственного расположения обрабатываемой детали и компонентов системы в течение всего процесса обработки. Комплексный принцип рассмотрения данной проблемы создает условия для формирования полноценной системы проектирования, описывающей все аспекты процесса разработки и управления технологическими процессами проходного бесцентрового шлифования и их автоматизации.

Список литературы

1. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.
3. Безъязычный В. Ф. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 2013. 568 с.
4. Прохоров А. Ф., Константинов К. Н., Волков Л. П. Наладка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков. М. : Машиностроение, 1976. 192 с.
5. Филькин В. П., Колтунов И. Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М. : Машиностроение, 1971. 204 с.
6. Муцянюк В. И., Братчиков А. Я. Бесцентровое шлифование. Л. : Машиностроение, 1986. 96 с.
7. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 8. С. 36–39.
8. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования // Воронежский научно-технический вестник. 2024. Т. 1 (470). С. 61–69.
9. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Ульянова Л. Д., Шалунов В. В. Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 147–160.
10. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 144–153.
11. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 149–159.
12. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Снижение трудоемкости наладки операций проходного бесцентрового шлифования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 8 (291). С. 21–30.
13. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 142–156.
14. Слонимский В. И. Теория и практика бесцентрового шлифования. Л. : Машгиз, 1952. 283 с.
15. Ашкиназий Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М. : Машиностроение, 2003. 352 с.
16. Митин С. Г., Бочкарев П. Ю. Разработка моделей и методик автоматизации проектных процедур для проектирования технологических операций со сложной структурой // Автоматизация в промышленности. 2018. № 2. С. 45–51.

17. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И. Оценка условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 109–117.

References

1. Suslov A.G. (ed.). *Spravochnik tekhnologa = Technologist's Handbook*. Moscow: Innovatsionnoe mashi-nostroenie, 2019:800. (In Russ.)
2. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. (eds.). *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya: v 2 t. 4-e izd., pererab. i dop. = Handbook of a mechanical engineer: in 2 volumes. The 4th edition, revised and supplemented*. Moscow: Mashinostroenie, 1986;2:496. (In Russ.)
3. Bez'yazychnyy V.F. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov = Fundamentals of mechanical engineering technology: textbook for universities*. Moscow: Mashinostroenie, 2013:568. (In Russ.)
4. Prokhorov A.F., Konstantinov K.N., Volkov L.P. *Naladka i ekspluatatsiya bes-sentrovyykh shlifoval'nykh stankov = Adjustment and operation of centerless grinding machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1976:192. (In Russ.)
5. Fil'kin V.P., Koltunov I.B. *Progressivnyye metody bes-sentrovogo shlifovaniya = Progressive methods of centerless grinding*. Moscow : Mashinostroenie, 1971:204. (In Russ.)
6. Mutsyanko V.I., Bratchikov A.Ya. *Bestsentrovoye shlifovanie = Centerless grinding*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986:96. (In Russ.)
7. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Structuring of centerless grinding methods using cluster analysis. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd Technical University*. 2022;(8):36–39. (In Russ.)
8. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Grouping of longitudinal centerless grinding operations according to technological characteristics. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik = Voronezh scientific and technical bulletin*. 2024;1(470):61–69. (In Russ.)
9. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Ul'yanova L.D., Shalunov V.V. Improving the technological preparation of the centerless grinding operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiiye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(4):147–160. (In Russ.)
10. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Definition of setup parameters for centerless through-feed grinding operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiiye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(3):144–153. (In Russ.)
11. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Interrelation of forces in continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiiye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):149–159. (In Russ.)
12. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Reducing the labor intensity of setting up centerless grinding operations. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd Technical University*. 2024;(8):21–30. (In Russ.)
13. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Justification of the parameters for setting up centerless grinding operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiiye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):142–156. (In Russ.)
14. Slonimskiy V.I. *Teoriya i praktika bes-sentrovogo shlifovaniya = Theory and practice of centerless grinding*. Leningrad: Mashgiz, 1952:283. (In Russ.)
15. Ashkinazyi Ya.M. *Bestsentrovyye shlifoval'nyye stanki. Konstruktsii, obrabotka i pravka = Centerless grinding machines. Design, processing and dressing*. Moscow: Mashinostroenie, 2003:352. (In Russ.)

16. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Development of models and methods for automating design procedures for designing technological operations with a complex structure. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry*. 2018;(2):45–51. (In Russ.)
17. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I. Evaluation of the condition of force closure during setup of the operation of continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):109–117. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Витальевич Малинин

аспирант, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (Россия, г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: mpv92@yandex.ru

Pavel V. Malinin

Postgraduate student, Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University (6A Lenina street, Kamyshin, Russia)

Петр Юрьевич Бочкарев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения и прикладной механики, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (Россия, г. Камышин, ул. Ленина, 6А); профессор кафедры технического обеспечения АПК, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (Россия, г. Саратов, ул. Советская, 60)

E-mail: bpu@mail.ru

Petr Yu. Bochkarev

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of engineering technology and applied mechanics, Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University (6A Lenina street, Kamyshin, Russia); professor of the sub-department of technical support of the agro-industrial complex, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya street, Saratov, Russia)

Игорь Иосифович Артемьев

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

Igor' I. Artemov

Doctor of engineering sciences, professor, director of the Research Institute of Fundamental and Applied Research, 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 10.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.04.2025

Принята к публикации / Accepted 22.04.2025

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.