

ISSN 2949-0693

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

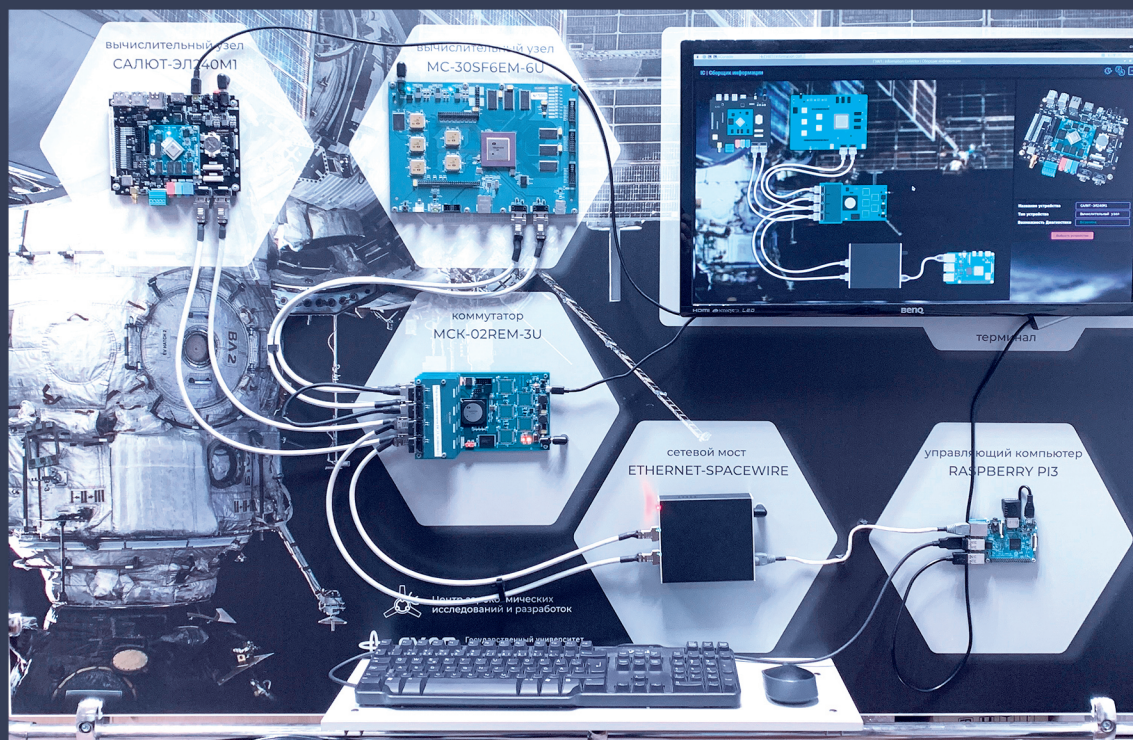
Научный журнал

Том 3, № 5 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION



ГУАП





ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 3, № 5 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 3, no. 5 • 2024



SUAI

Saint Petersburg
State University
of Aerospace
Instrumentation

Innovative Instrumentation

Founded in 2022

Founder

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Publisher

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Chief Editor

E. A. Frolova,
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,
Director at the Institute of Fundamental
Training and Technological Innovation,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Media (Roskomnadzor),
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

Publication frequency: 6 issues per year

The journal's pages are open for discussion
materials; its content does not necessarily reflect
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal
"Innovative Instrumentation" to foreign editions
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"
is mandatory.

Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation
Tel.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Website: <https://guap.ru/inps>

Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. I. Shevchenko, D. Sc.
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Editor *V. A. Chernikova*
Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 29.10.2024. Signed for printing: 31.10.2024. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5

ISSN 2949-0693

Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Главный редактор

Е. А. Фролова,
доктор технических наук, доцент,
директор института фундаментальной
подготовки и технологических инноваций,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,
кандидат технических наук, доцент

Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496
от 24.06.2022 – печатное издание)

Периодичность издания: 6 номеров в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных
материалов; его содержание не обязательно
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное
приборостроение» в зарубежные издания допускается
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»
обязательна.

Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
Тел.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Сайт: <https://guap.ru/inps>

Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Редактор *В. А. Черникова*
Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 29.10.2024. Дата выхода в свет: 31.10.2024. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 11,2. Усл. печ. л. 10,5. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 387.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СМИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.

Научная статья
УДК 338.2

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-5-9

Методика прогнозирования потребительской ценности инновации

Дарья Сергеевна Шукина¹

✉ shchukinadaria00@gmail.com, SPIN-код: 1760-4247

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Определена достаточная критериальная база для оценки потребительских и технических характеристик ценностной инновации, присвоены весовые коэффициенты экспертным методом, разработана методика фронтирования ценностных инноваций и представлена квалиметрическая шкала для интерпретации полученных результатов.

Ключевые слова: инновации, тренды, формирование трендов, патентный анализ, ценностные инновации

Для цитирования: Шукина Д. С. Методика прогнозирования потребительской ценности инновации // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 5–9. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-5-9.

Original article

Methodology for predicting the consumer value of innovation

Daria S. Shchukina¹

✉ shchukinadaria00@gmail.com, SPIN-code: 1760-4247

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The work defines a sufficient criterial base for assessing the consumer and technical characteristics of a value-based innovation, assigns weighting coefficients using the expert method, develops a methodology for fronting value-based innovations, and presents a qualimetric scale for interpreting the results obtained.

Keywords: innovations, trends, trends formation, patent analysis, value innovations

For citation: Shchukina D. S. Methodology for predicting the consumer value of innovation. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):5–9. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-5-9.

В условиях ускоряющейся динамики технологического прогресса и глобализации рыночных отношений проблема адекватного и точного прогнозирования потребительской ценности инноваций становится одной из ключевых задач современного инновационного менеджмента. На основании «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», финансирование инновационного сектора экономики является ключевым фактором развития новых технологий [1]. Уровень конкуренции на международных рынках заставляет компании инвестировать значительные ресурсы в разработку и внедрение инновационных продуктов и услуг, одновременно сталкиваясь с риском непредсказуемости потребительских предпочтений и рыночных трендов.

Значимость инновационного развития современной экономики определяется по некоторым направлениям развития и играет важную роль в становлении стабильного, эффективного и полноценного функционирования государственных систем. В обращении Президента Российской Федерации говорится: «Для выхода на новый уро-

вень развития экономики, социальных отраслей нам нужны собственные передовые разработки и научные решения. Необходимо сосредоточиться на направлениях, где накапливается мощный технологический потенциал будущего, а это цифровые, другие, так называемые сквозные технологии, которые сегодня определяют облик всех сфер жизни, применяются во всех отраслях – это цифровые, квантовые, нейротехнологии, робототехника и так далее» [2].

«Потребительская ценность инновации» представляет собой комплексное понятие, включающее в себя оценку полезности, экономической выгоды, социальной значимости, эмоциональной и функциональной удовлетворенности, которую потребитель получает от использования нового продукта или услуги. Прогнозирование данной ценности требует интеграции междисциплинарных подходов, включающих в себя методы экономического анализа, поведенческой экономики, психологии потребителей, теории принятия решений, а также современных математических и статистических инструментов [3].

Формирование критериальной базы для оценки потребительских характеристик представляет собой значимый этап в процессе разработки и совершенствования продукции или услуг, ориентированных на удовлетворение нужд и ожиданий потребителей. Такая база позволяет провести объективную оценку качества товара или услуги, выявить их сильные и слабые стороны, а также на основании полученных данных принять обоснованные управленческие решения.

Формирование тренда ценностной инновации требует системного подхода, который включает в себя интеграцию потребительских характеристик и соответствующих технических параметров в контексте крупнозернистых групп индикаторов. Это позволяет проектировать продукты и услуги, которые не только соответствуют или превосходят технические стандарты, но и удовлетворяют или превышают ожидания целевой аудитории.

Категоризация потребительских характеристик в макрогруппы инвариантов обеспечивает систематическое представление данных. Для каждого укрупненного потребительского инварианта выделяются соответствующие технические параметры, подверженные оценке через метрики

инженерного анализа и системного проектирования. Сравнительный анализ осуществляется на основе когнитивно-структурного моделирования и инвариантного сравнения. Выявление корреляционных зависимостей и расхождений между ожиданиями потребителей и существующими техническими возможностями важно для выявления направлений инновационного развития [4].

В табл. 1 приведены критерии оценки технических и потребительских характеристик ценностных инноваций, а также весовые коэффициенты групп технических и потребительских характеристик на основании экспертной оценки.

Методика фронтирования ценностных инноваций включает в себя несколько ключевых этапов. Данный процесс необходим для генерирования инновационных идей, которые предлагают значительное увеличение ценности для потребителя, успешного их воплощения и коммерциализации. В методике также будут учтены уровни зрелости тренда для определения этапа перехода на высший или низший уровень, а, следовательно, на основании этого возможно будет разрабатывать стратегию по улучшению ценностной инновации для ее прогресса.

- Таблица 1. Критерии оценки технических и потребительских характеристик
- Table 1. Criteria for assessing technical and consumer characteristics

Номер п/п	Группа показателей	Описание	$K_{п.х}$	$K_{т.х}$
1	Показатели назначения (N)	Отражают степень соответствия продукции ее функциональному предназначению и эффективности выполнения заданных функций. Включают в себя такие параметры, как, например, производительность, точность, мощность и другие характеристики, определяющие функциональные свойства изделия	0,22	0,16
2	Показатели надежности (P)	Долговечность, износостойкость, безотказность работы в течение жизненного цикла изделия. Определяют вероятность отказа продукции в процессе эксплуатации и степень ее восстанавливаемости	0,18	0,18
3	Эстетические и эргономические показатели (I)	Оценивают комфорт использования продукции для человека, включая такие элементы, как удобство, безопасность, эстетические и дизайнерские качества. Эргономические показатели обеспечивают соответствие антропометрическим и физиологическим особенностям пользователя, а эстетические – удовлетворение эстетических потребностей и предпочтений	0,18	0,02
4	Показатели транспортабельности (T)	Отражают способность товара сохранить свои качественные и количественные свойства при транспортировке	0,17	0,11
5	Показатели стандартизации и унификации (S)	Отражают уровень стандартизации и унификации продукции	0,05	0,16
6	Патентно-правовые показатели (PP)	Охватывают патентную чистоту, патентоспособность и защищенность продукции от несанкционированного использования	0,05	0,21
7	Экономические показатели (U)	Себестоимость, окупаемость, рентабельность и другие показатели, определяющие стоимость продукции и ее экономическую эффективность	0,15	0,16

Для оценки значения прогноза тренда ценностной инновации будет использоваться соотношение показателей потребительских характеристик к заявленным техническим характеристикам с учетом коэффициента весомости и уровня зрелости тренда ценностной инновации [5].

Методика фронтирования ценностных инноваций представляет собой циклический и интерактивный процесс, направленный на создание продуктов и услуг, предлагающих значительную ценностную добавленную стоимость. Учет уровней зрелости трендов позволяет глубже понять рыночные условия и более точно разрабатывать стратегии по продвижению и улучшению инноваций, обеспечивая их устойчивый прогресс на рынке.

Этапы реализации методики фронтирования тренда ценностной инновации показаны на рисунке.

Индекс качества рассчитывается как отношение комплексной оценки потребительских характеристик к техническим (1), (2):

$$C = \left\{ \begin{matrix} C_{ур.зр1} \\ C_{ур.зр2} \\ C_{ур.зр3} \\ C_{ур.зр4} \\ C_{ур.зр5} \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

где $C_{ур.зрn} = \{N_{ур.зрn}; P_{ур.зрn}; I_{ур.зрn}; T_{ур.зрn}; S_{ур.зрn}; PP_{ур.зрn}; U_{ур.зрn}\}$;

$$C_{ур.зрn} = \left\{ \begin{matrix} N_{ур.зрn} = \frac{N_{ур.зрnнх} 100 \%}{N_{ур.зрnтх}} \\ P_{ур.зрn} = \frac{P_{ур.зрnнх} 100 \%}{P_{ур.зрnтх}} \\ I_{ур.зрn} = \frac{I_{ур.зрnнх} 100 \%}{I_{ур.зрnтх}} \\ T_{ур.зрn} = \frac{T_{ур.зрnнх} 100 \%}{T_{ур.зрnтх}} \\ S_{ур.зрn} = \frac{S_{ур.зрnнх} 100 \%}{S_{ур.зрnтх}} \\ PP_{ур.зрn} = \frac{PP_{ур.зрnнх} 100 \%}{PP_{ур.зрnтх}} \\ U_{ур.зрn} = \frac{U_{ур.зрnнх} 100 \%}{U_{ур.зрnтх}} \end{matrix} \right\}. \quad (2)$$

В соответствии со значением индекса будут произведены прогноз развития тренда ценностной инновации и выбор стратегии для улучшения значения потребительских характеристик за счет изменения технических. Для интерпретации результатов представлена квалиметрическая шкала (табл. 2).

Благодаря комплексному охвату всех релевантных факторов и их весомому учету в процессах анализа и принятия решений, этот инструмент становится незаменимым в управлении инновационными проектами.

Этап 1	Определение уровня зрелости тренда ценностной инновации	Модель оценки уровня зрелости тренда ценностной инновации $УР.З = \{УН; ВМ; А; ЧК\}$
Этап 2	Формирование критериальной базы потребительских характеристик ценностной инновации	Номенклатура показателей качества $q_{пх} = \{N; P; I; T; S; PP; U\}$
Этап 3	Формирование критериальной базы технических характеристик ценностной инновации	Номенклатура показателей качества $q_{Тх} = \{N; P; I; T; S; PP; U\}$
Этап 4	Расчет индекса качества тренда	$C = \{C_{ур.зр1}; C_{ур.зр2}; C_{ур.зр3}; C_{ур.зр4}; C_{ур.зр5}\}$
Этап 5	Интерпретация результатов оценки индекса качества тренда	Квалиметрическая шкала интерпретации значения фронтиров тренда
Этап 6	Разработка стратегии	Результаты оценки индекса качества тренда

- Методика фронтирования тренда ценностной инновации
- Methodology for fronting the trend of value innovation

- Таблица 2. Квалиметрическая шкала интерпретации значения фронтиров тренда
- Table 2. Qualimetric scale for interpreting the meaning of trend frontiers

Интервал	Балльная оценка	Интерпретация
$0 < C \leq 0,2$	1	Тренд затухающий, нестабильный. Для перехода на высшие уровни зрелости необходимо пересмотреть технические характеристики более чем 70 % показателей и привести их в соответствие потребителскому запросу
$0,2 < C \leq 0,4$	2	Тренд на начальном этапе, нестабильный. Для перехода на высшие уровни зрелости необходимо пересмотреть технические характеристики более чем 80 % показателей и привести их в соответствие потребителскому запросу
$0,4 < C \leq 0,6$	3	Тренд на этапе роста, нестабильный. Для перехода на высшие уровни зрелости необходимо пересмотреть технические характеристики более чем 30 % показателей и привести их в соответствие потребителскому запросу
$0,6 < C \leq 0,8$	4	Тренд стабильный. Для сохранения уровня зрелости 3–4 необходимо внести 10 % изменений в технические характеристики в соответствии с запросами потребителей
$0,8 < C \leq 1$	5	Тренд стабильный, находится на пике, технические характеристики ценностной инновации на 90 % соответствуют запросам потребителей

Применение данных систем способствует более глубокому пониманию факторов, влияющих на успешность инноваций на различных стадиях их развития. Это, в свою очередь, позволяет компаниям более эффективно аллоцировать ресурсы, минимизировать риски и разрабатывать высокоэффективные стратегии дифференциации

на рынке. Методика фронтирования ценностных инноваций также способствует улучшению коммуникации между различными заинтересованными сторонами проекта, обеспечивая обоснованность и прозрачность в оценках и принятии решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации утв. указом Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 20.09.2024).
2. Послание Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. «О положении в стране и основных направлениях внутренней и внешней политики государства». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41550> (дата обращения: 20.09.2024).
3. Антонов В. В. Оценка потребительских свойств инновационной продукции // Экономика и управление предприятиями. 2018. № 6. С. 45–52.
4. Назаревич С. А. Показатели инновационного поведения для мониторинга состояния готовности организационной системы к проведению изменений // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. 2023. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-innovatsionnogo-povedeniya-dlya-monitoringa-sostoyaniya-gotovnosti-organizatsionnoy-sistemy-k-provedeniyu-izmeneniy> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Петрова М. С. Влияние инноваций на потребительскую ценность товаров // Вопросы инновационного управления. 2020. № 3. С. 121–127.

REFERENCES

1. Strategy for scientific and technological development of the Russian Federation approved. Decree of the President of the Russian Federation dated February 28, 2024 No. 145. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> [Accessed 20 September 2024].
2. Message of the President of the Russian Federation dated December 1, 2016 “On the situation in the country and the main directions of the state’s domestic and foreign policy”. Available from: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41550> [Accessed 20 September 2024].

3. Antonov V. V. Assessment of consumer properties of innovative products. *Economics and enterprise management*. 2018;(6):45–52. (In Russ.).
4. Nazarevich S. A. Indicators of innovative behavior for monitoring the state of readiness of the organizational system for changes. *Bulletin of MSTU im. G. I. Nosova*. 2023;(1). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-innovatsionnogo-povedeniya-dlya-monitoringa-sostoyaniya-gotovnosti-organizatsionnoy-sistemy-k-provedeniyu-izmeneniy> [Accessed 20 September 2024].
5. Petrova M. S. The influence of innovation on the consumer value of goods. *Issues of innovation management*. 2020;(3):121–127. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Щукина Дарья Сергеевна, ассистент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – инновации, аддитивные технологии, оценка качества, роботизация, автоматизация, организация производства.

Поступила в редакцию 23.09.2024

Поступила после рецензирования 26.09.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Shchukina Daria S., Assistant at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – innovations, additive technologies, quality assessment, robotization, automation, production organization.

Received 23.09.2024

Revised 26.09.2024

Accepted 10.10.2024

Научная статья
УДК 658.5.012.14

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-10-22

Симуляционное моделирование управления емкостью буфера как ключевой фактор оптимизации производительности роботизированной линии розлива

Евгений Станиславович Квас¹

✉ e.kvas@guap.ru, orcid.org/0000-0001-5164-8454, SPIN-код: 8721-1770, Author ID: 1255968

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-код: 3957-5891, Author ID: 910148

Владимир Павлович Кузьменко¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875, SPIN-код: 3159-4202, Author ID: 1111872

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследуется влияние управления емкостью буфера на производительность роботизированной линии розлива с использованием метода дискретного событийного моделирования. Целью работы является оценка возможностей оптимизации производственного процесса за счет правильного управления буфером, который компенсирует потери, вызванные простоями оборудования. В рамках исследования построена симуляционная модель, которая позволяет оценить влияние различных сценариев времени восстановления после значительных сбоев и изменения емкости буфера на общую производительность системы. Проведенный анализ показал, что увеличение емкости буфера до оптимального значения позволяет существенно повысить эффективность системы и снизить влияние времени простоев. Модель была верифицирована с помощью реальных экспериментальных данных, что подтвердило ее применимость для оптимизации работы производственных линий. Данная модель предоставляет возможность прогнозирования поведения системы и принятия обоснованных решений по улучшению ее устойчивости и производительности.

Ключевые слова: симуляционное моделирование, роботизированная линия розлива, регулирование емкости буфера, оптимизация производительности производственной линии

Для цитирования: Квас Е. С., Солёный С. В., Кузьменко В. П. Симуляционное моделирование управления емкостью буфера как ключевой фактор оптимизации производительности роботизированной линии розлива // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 10–22. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-10-22.

Original article

Simulation modeling of buffer capacity management as a key factor in optimizing the performance of a robotic bottling line

Evgeniy S. Kvas¹

✉ e.kvas@guap.ru, orcid.org/0000-0001-5164-8454, SPIN-code: 8721-1770, Author ID: 1255968

Sergey V. Solyonyj¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-code: 3957-5891, Author ID: 910148

Vladimir P. Kuzmenko¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875, SPIN-code: 3159-4202, Author ID: 1111872

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper investigates the impact of buffer capacity management on the performance of a robotic bottling line using discrete-event simulation. The primary goal of the research is to evaluate the optimization potential of the production process through effective buffer management, which mitigates losses caused by equipment downtime. A simulation model was developed to assess the influence of various recovery time scenarios after significant failures and buffer capacity changes on the overall system performance. The analysis demonstrated that increasing buffer capacity to an optimal level significantly improves system efficiency and reduces the impact of downtime. The model was validated using real experimental data, confirming its applicability for optimizing production line performance. This model enables the prediction of system behavior and supports informed decision-making for enhancing system resilience and efficiency.

Keywords: simulation modeling, robotic bottling line, buffer capacity regulation, production line performance optimization

For citation: Kvas E. S., Solyonyj S. V., Kuzmenko V. P. Simulation modeling of buffer capacity management as a key factor in optimizing the performance of a robotic bottling line. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):10–22. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-10-22.

Введение

В современном промышленном производстве высокоскоростные роботизированные линии розлива играют ключевую роль в обеспечении эффективности и конкурентоспособности компаний. Однако сложность таких систем делает их уязвимыми к различным сбоям и отклонениям, которые могут привести к снижению производительности, увеличению потерь и ухудшению качества продукции. Современные высокоскоростные роботизированные линии розлива (РЛР) требуют значительных финансовых затрат, особенно на этапе пусконаладочных работ (ПНР), и любые изменения в работе одной ячейки могут сразу же повлиять на общую эффективность системы. Поэтому важно обеспечивать их функционирование в наиболее оптимальных условиях. Для этого необходимо иметь возможность проводить детальный анализ различных сценариев «что, если» с целью выявления ограничений производственной линии и оценки альтернативных стратегий улучшения [1]. Такие сценарии позволяют изменять условия работы системы и оценивать ее способность справляться с повышенными нагрузками и снижать потери. В этом контексте компьютерное моделирование становится незаменимым инструментом [2].

Компьютерное моделирование представляет собой метод изучения различных моделей реальных систем посредством численного анализа с использованием специализированного программного обеспечения, имитирующего операции или характеристики этих систем в динамике [3]. С практической точки зрения это процесс создания компьютерной модели существующей или планируемой системы для проведения экспериментов и получения более глубокого понимания ее поведения при заданных условиях.

В рамках данного исследования под моделированием понимается процесс разработки компьютерной модели системы (и процесса), проведение экспериментов с этой моделью с целью понимания поведения системы и (или) оценки различных стратегий ее функционирования. Таким образом, в рамках данного исследования процесс моделирования включает в себя как построение модели, так и ее использование для анализа и решения поставленных задач.

Цель исследования – оценить и улучшить производительность линии розлива с помощью дискретного событийного моделирования для того, чтобы выявить положительные качества описанных подходов в моделировании в процессе принятия решений по оптимизации ПНР и работ по техническому обслуживанию и кон-

тролю качества роботизированных линий розлива.

Задачей данного исследования является разработка методики применения дискретного событийного моделирования в контексте роботизированных линий розлива, которая позволяет:

1) идентифицировать «узкие» места в производственном процессе и определить основные источники потерь;

2) производить оценку влияния различных факторов на производительность и качество продукции, включая технические сбои, организационные аспекты и параметры управления;

3) моделировать и сравнивать различные сценарии улучшения производственного процесса без необходимости вмешательства в реальную систему.

Теоретические аспекты моделирования для повышения эффективности роботизированных производственных линий

Моделирование играет ключевую роль в повышении производительности и снижении операционных рисков в современных производственных системах. Эффективность таких систем напрямую зависит от способности выявлять «узкие» места, сбои и их причины, а также прогнозировать потенциальные последствия [4, 5]. Производственные сбои, будь то кратковременные или системные, могут приводить к значительным потерям, ухудшению качества продукции и снижению общей безопасности рабочих процессов, что, в свою очередь, негативно влияет на экономические показатели предприятия. В связи с этим одной из основных задач является не только минимизация, но и профилактика таких нарушений [6, 7].

Применение дискретного событийного моделирования (ДСМ) становится особенно актуальным в контексте роботизированных производственных линий, где любые сбои могут иметь каскадный эффект, влияющий на всю цепочку процессов [8, 9]. В отличие от традиционных методов анализа, которые часто фокусируются на ретроспективном изучении производственных данных, моделирование позволяет заранее прогнозировать последствия различных сценариев и проводить количественную оценку возможных улучшений [11, 12].

Производственные нарушения могут появляться на различных уровнях системы, начиная с организационных и плановых и заканчивая техническими и операционными сбоями. Важно

понимать, что разные типы сбоев требуют различных подходов к их устранению. Например, если сбой организационного характера могут быть решены пересмотром планов и стратегии работы, то технические сбои требуют более глубокой диагностики и часто связаны с необходимостью изменений в самой архитектуре системы.

Существует несколько классификаций производственных нарушений, но для целей нашей работы целесообразно разделить их на три основные категории: простои, потери скорости и снижение качества продукции. Сокращение времени простоев представляет собой одну из наиболее приоритетных задач, поскольку это напрямую влияет на производственные циклы и общую эффективность системы. ДСМ позволяет моделировать подобные сценарии простоев и тестировать различные стратегии по их устранению.

Системы, в которых внедрены роботизированные решения, имеют высокую динамику и сложность, что делает моделирование наиболее подходящим инструментом для их анализа. Традиционные методы анализа данных не всегда позволяют учесть весь спектр факторов, влияющих на производительность, особенно когда речь идет о непредсказуемых сбоях и их взаимосвязях. ДСМ позволяет учитывать такие факторы, как вариабельность входных параметров, скорость производства и возможные точки сбоя оборудования, что делает его идеальным для оптимизации производственных процессов.

В отличие от непрерывных моделей, где изменения происходят постепенно, ДСМ оперирует событиями, которые могут внезапно прерывать процесс. Это делает данный метод моделирования особенно эффективным для производственных систем с высоким уровнем автоматизации, таких как роботизированные линии розлива, где сбой в одном звене могут вызвать цепную реакцию.

Современные исследования показывают, что наиболее успешные производственные системы активно применяют моделирование не только для анализа текущей ситуации, но и для прогнозирования будущих изменений. Одним из ключевых преимуществ ДСМ является его способность работать в режиме реального времени, позволяя менеджерам получать обновленные данные по работе системы и оперативно реагировать на возникающие сбои. Это открывает новые возможности для предотвращения нарушений и оптимизации работы оборудования, что особенно важно для высокоскоростных производственных линий.

Для разработки точной модели роботизированной линии розлива на основе ДСМ необходимо математически формализовать динамику

производственного процесса и влияния отказов. Рассмотрим основные уравнения и принципы, которые помогут построить такую модель.

Пусть $T_{\text{общ}}$ – общее время работы линии; $T_{\text{простоя}}$ – время простоя системы, связанное с техническими сбоями и остановками; $T_{\text{работы}}$ – эффективное время работы оборудования. Тогда соотношение между этими параметрами:

$$T_{\text{работы}} = T_{\text{общ}} - T_{\text{простоя}}$$

Однако данное математическое выражение может быть верным только в случае идеальной системы, и для того, чтобы оно было более реалистичным, необходимо ввести случайную величину $\tau_{\text{отказ}}$, описывающую вероятность возникновения отказов. Для оценки вероятности отказа оборудования используется экспоненциальное распределение:

$$P(\tau_{\text{отказ}} \leq t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность отказов оборудования.

Это позволяет моделировать стохастическую природу отказов и их влияние на производительность.

Для оценки производительности системы введем $N_{\text{макс}}$ – максимальное количество единиц продукции, которое может быть произведено за время $T_{\text{работы}}$. Тогда реальная производительность $N_{\text{реал}}$ с учетом потерь, вызванных простоями и сбоями, будет иметь следующее выражение:

$$N_{\text{реал}} = N_{\text{макс}} (1 - T_{\text{простоя}}/T_{\text{общ}}).$$

При этом $T_{\text{простоя}}$ может быть моделировано как функция отказов $\tau_{\text{отказ}}$ и времени восстановления оборудования $T_{\text{восст}}$, что приводит к интегральному уравнению для описания времени простоя:

$$T_{\text{простоя}} = \int_0^{T_{\text{общ}}} (\tau_{\text{отказ}} + T_{\text{восст}}) dt.$$

Применим анализ Парето для классификации отказов и определения, какие из них оказывают наибольшее влияние на производительность системы. Пусть $F_{\text{отказ}}$ – функция распределения отказов по типам:

$$F_{\text{отказ}} = \{F_1, F_2, \dots, F_n\},$$

где F_1 – наиболее частые отказы; F_n – наименее частые. Согласно принципу Парето, 20 % отказов могут приводить к 80 % потерь времени, что позволяет сфокусироваться на ключевых проблемах.

- Таблица 1. Основные категории нарушений и их влияние на производительность роботизированной линии розлива
- Table 1. Primary categories of malfunctions and their impact on the performance of the robotic bottling line

Категория нарушений	Тип нарушений	Описание
Потери времени (простои)	Запланированные остановки	Остановки для технического обслуживания или переналадки оборудования, например, замена фильтров или калибровка оборудования для розлива
	Незапланированные остановки	Неожиданные остановки из-за поломок оборудования, повреждений конвейера или сбоя в работе роботов. Пример: поломка датчика температуры, остановка из-за блокировки бутылок на конвейере
Потери производительности (скорости работы)	Потери скорости на конвейере	Уменьшение скорости перемещения бутылок из-за проблем с конвейером, заторов или сбоя в системе управления скоростью. Пример: замедление конвейера из-за скопления бутылок
	Замедление работы филлера	Снижение скорости наполнения из-за нестабильного давления или неисправностей в системе подачи жидкости. Пример: замедление розлива из-за низкого давления в системе подачи
	Постепенный разгон	Потери времени на восстановление рабочей скорости после перезапуска системы. Пример: замедленный запуск оборудования после технического обслуживания
Ухудшение качества продукции	Брак продукции	Неправильное наполнение бутылок, дефекты упаковки. Пример: отбраковка бутылок с недостаточным уровнем жидкости из-за сбоя в дозаторе
	Корректировка продукции	Требуются повторные корректировки продукции, например, повторное наполнение или упаковка. Пример: нарушение упаковки при запечатывании бутылок

Для наглядного представления классификации нарушений и их влияния на работу роботизированной линии розлива в табл. 1 приведены основные категории сбоев и примеры их проявления в контексте производственного процесса.

Система может быть описана дифференциальными уравнениями для моделирования потока продукции и отказов. Пусть $x(t)$ – количество произведенных единиц продукции к моменту времени t , тогда динамика системы может быть описана уравнением:

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t)\Theta(T_{\text{работы}} - t),$$

где $v(t)$ – скорость производства; $\Theta(T_{\text{работы}} - t)$ – индикаторная функция, показывающая, что процесс продолжается до момента отказа.

Таким образом, предложенные формулы и уравнения формализуют процессы производства, моделируя как детерминированные, так и стохастические аспекты работы роботизированной линии. Это позволяет перейти от простой математической модели к более фундаментальному анализу, учитывающему как динамику отказов, так и их влияние на производительность системы.

Характеристика исследуемого объекта

Объектом исследования является высокоавтоматизированная роботизированная линия розлива напитков, предназначенная для обеспечения непрерывного производства с минимальным количеством остановок и максимальной производительностью. Данная линия представляет собой сложную систему, включающую в себя несколько ключевых этапов, каждый из которых интегрирован в общую архитектуру производственного процесса. Рассмотрим основные процессы, которые обеспечивают работу линии.

1. *Этап подготовки тары.* На первом этапе пустые бутылки поступают на линию через станцию депаллетизации. С помощью роботизированной руки бутылки отделяются от паллеты, после чего передаются на конвейер. На этапе ориентации бутылок используются оптические сенсоры и механизмы поворота, которые выравнивают тару для правильной подачи на станцию розлива. Важно отметить, что качество работы на этом этапе напрямую влияет на скорость и точность последующих операций, так как любые сбой или неправильная ориентация могут привести к задержкам на линии.

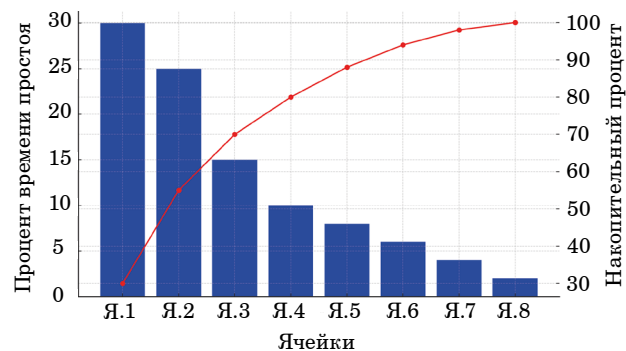
2. *Розлив напитков* – это центральный процесс линии, в ходе которого напиток поступает в бутылки через специализированные машины – филлеры. В зависимости от типа напитка (газированный или негазированный) используется различное оборудование для обеспечения стабильного давления и точной дозировки. Каждая бутылка проходит через систему дозирования, оснащенную датчиками уровня жидкости, которые минимизируют вероятность переполнения или недостаточного наполнения. Для увеличения производительности на линии может использоваться параллельный розлив, когда одновременно заполняются несколько бутылок. Например, одна станция розлива может одновременно наполнять до шести бутылок с точностью до миллилитра.

3. *Закупорка и герметизация* – после розлива бутылки переходят на станцию закупорки, где с помощью автоматизированных устройств крышки подаются, ориентируются и завинчиваются. Важную роль на этом этапе играет система контроля усилия завинчивания, которая гарантирует надежную герметизацию без риска повреждения тары. При работе с газированными напитками также осуществляется контроль давления, чтобы исключить утечки и деформацию бутылок. В некоторых случаях дополнительно может использоваться герметизация фольгой для улучшения защиты продукта.

4. *Этикетирование и упаковка* – наполненные и закупоренные бутылки переходят на следующую стадию, где с помощью этикетировочных машин происходит наклеивание этикеток. Этот процесс требует точной координации, так как скорость движения конвейера и операция наклейки этикетки должны синхронизироваться для предотвращения дефектов. Далее бутылки группируются в упаковки (например, по 6 или 12 штук), после чего оборачиваются термоусадочной пленкой и поступают на паллетизатор для укладки на паллеты. Этот этап крайне важен для оптимизации логистических процессов, так как правильная упаковка влияет на сохранность продукции при транспортировке.

Анализ отказов на роботизированных линиях розлива показывает, что около 20 % ячеек оборудования могут приводить к 80 % общих простоев. Для точного определения критических точек системы был проведен анализ по методу Парето, который позволил выделить те участки линии, которые оказывают наибольшее влияние на производительность.

Основные причины отказов включают в себя сбои в работе депаллетизатора, перегрузки на конвейерной линии, проблемы с до-



• *Рис. 1. Обобщенное распределение времени простоев по ячейкам роботизированной линии розлива напитков*

• *Fig. 1. Generalized distribution of downtime across cells in the robotic beverage bottling line*

зированием на этапе розлива, а также неполадки с системой завинчивания крышек. Данные о простоях были собраны с помощью системы мониторинга производительности, которая фиксировала время остановки каждой ячейки. Если простой превышал 2 мин, оператор был обязан ввести подробное описание причины в систему, что позволило детально проанализировать характер сбоев.

На основе проведенного анализа открытых данных было построено распределение времени простоев по ячейкам (рис. 1), где видно, что наибольшие задержки связаны с работой филлера (Я.1) и ячейкой для этикетирования (Я.2). Примером может служить остановка из-за неправильной подачи бутылок на этапе ориентации, что привело к временной остановке линии для устранения застрявшей тары. Аналогично проблемы с дозировкой напитков вызывали сбои, связанные с необходимостью корректировки работы насосов.

Симуляционная модель дискретного событийного моделирования роботизированной линии розлива

Ячейки, работающие на исследуемой линии розлива и упаковки напитков, подвержены сбоям, которые могут быть описаны параметрически с помощью распределений времени до ремонта (ВДР) и времени между отказами (ВМО). В модели рассматриваются два типа сбоев:

1) значительные сбои – серьезные поломки, такие как выход из строя подшипников, короткое замыкание или повреждение привода, которые требуют вмешательства технического персонала или стороннего обслуживания и приводят к длительным простоям;

2) микроостановки – вызваны эксплуатационными причинами (например, отсутствие упаковочного материала или застревание продукта в ячейке) или легко устранимыми техническими неполадками. Устраняются оператором и не требуют длительных ремонтов.

В модели критерием различия между двумя типами отказов является продолжительность. Все сбои, длящиеся более 120 с, считаются значительными и требуют детального объяснения от оператора или механика. Это гарантирует корректность моделирования и предотвращает искажение данных.

Для создания модели были использованы данные, собранные с линии розлива за трехмесячный период непрерывной эксплуатации. Для этого была применена система сбора данных (ССД), интегрированная с программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), которые управляют каждой ячейкой производственной линии. ССД автоматически регистрировала следующие параметры:

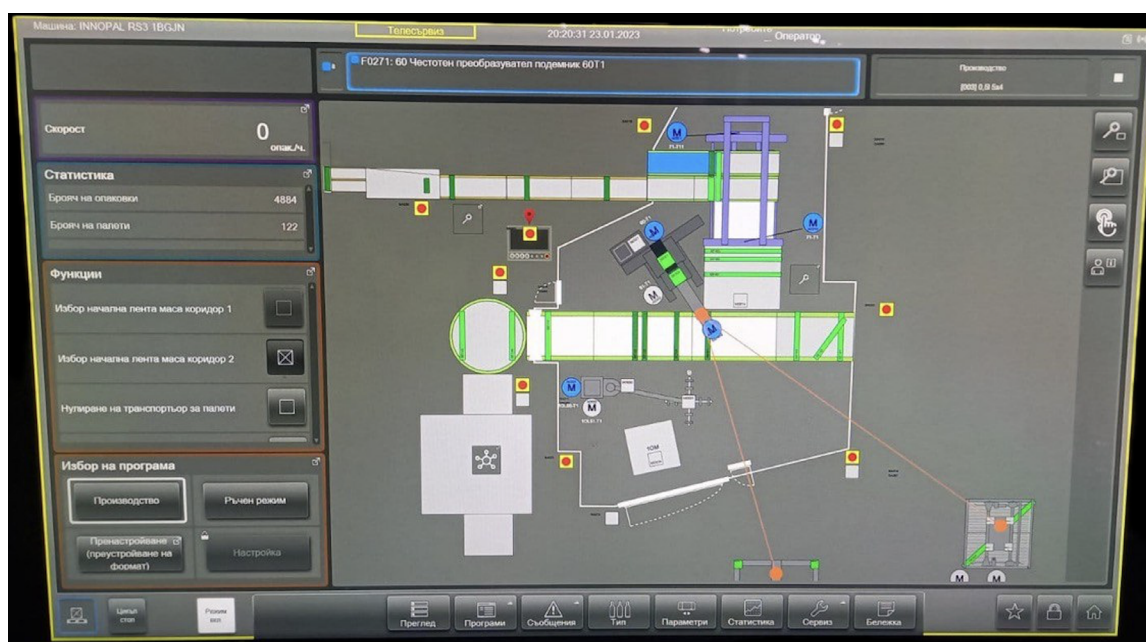
- время начала сбоя – момент, когда ячейка прекратила свою работу;
- время возобновления работы – момент, когда ячейка снова начала функционировать после устранения сбоя;
- код сбоя – идентификационный код, который присваивался каждому типу отказа в системе;
- описание сбоя – для сбоев продолжительностью более 120 с операторы или механики вводили текстовое описание проблемы, включая причины и действия по устранению.

Для построения модели использовались реальные производственные данные, собранные с линии розлива с помощью системы мониторинга, показанной на рис. 2. Эта система позволяет в режиме реального времени собирать информацию о работе каждой ячейки, включая время простоя, количество произведенных упаковок, наличие сбоев и ошибок. Она взаимодействует с ПЛК, отслеживая все процессы – от подачи тары до упаковки готового продукта.

Программное обеспечение предоставляет оператору полное управление линией, включая возможность настройки параметров работы, выбора режимов (автоматический и ручной), а также отслеживания производственных показателей и количества произведенной продукции. Эти данные являются основой для создания симуляционных моделей, которые позволяют точно описать поведение системы, а также провести анализ и оптимизацию процессов.

Интерфейс системы мониторинга, как видно из рис. 2, включает в себя визуальное представление производственной линии, что позволяет оператору легко отслеживать работу всех ячеек, управлять скоростью работы конвейеров и анализировать производственные данные в реальном времени.

На основании собранных данных были рассчитаны статистические распределения, которые описывают продолжительность ремонтов и интервалы между сбоями для каждой ячейки. В табл. 2 приведены моделируемые объекты, а



• Рис. 2. Интерфейс системы управления и мониторинга производственной линии розлива напитков
 • Fig. 2. Interface of the control and monitoring system for the beverage bottling production line

- Таблица 2. Моделируемые ячейки и их статистические распределения для значительных сбоев и микроостановок
- Table 2. Simulated cells and their statistical distributions for major failures and microstoppages

Ячейка	Описание	Производительность, шт./мин	Распределение сбоев
Розлива	Розлив напитка	1500	Значительные сбои: логнормальное распределение; микроостановки: эмпирическое распределение
Этикетирования	Нанесение этикеток	1400	Значительные сбои: инверсное гауссово распределение; микроостановки: эмпирическое распределение
Упаковки	Упаковка в коробки	58	Значительные сбои: распределение Джонсона; микроостановки: эмпирическое распределение
	Обертка пленкой	58	Значительные сбои: бета-распределение; микроостановки: эмпирическое распределение

также соответствующие распределения для значительных сбоев и микроостановок.

Обращаясь к диаграммам на рис. 3 (Я.1 и Я.6), можно увидеть распределение времени простоев по причинам, описанным в табл. 1, и их количественным параметрам, описанным в табл. 3. На рис. 3 причины обозначаются следующим образом:

– причина А (Я.1, Я.6) – запланированные остановки для технического обслуживания и переналадки оборудования;

– причина В (Я.1, Я.6) – незапланированные остановки из-за поломок, таких как сбои в работе датчиков температуры, проблемы с подачей бутылок на конвейер;

– причина С (Я.1) – потери скорости на конвейере из-за заторов или сбоев в системах управления скоростью;

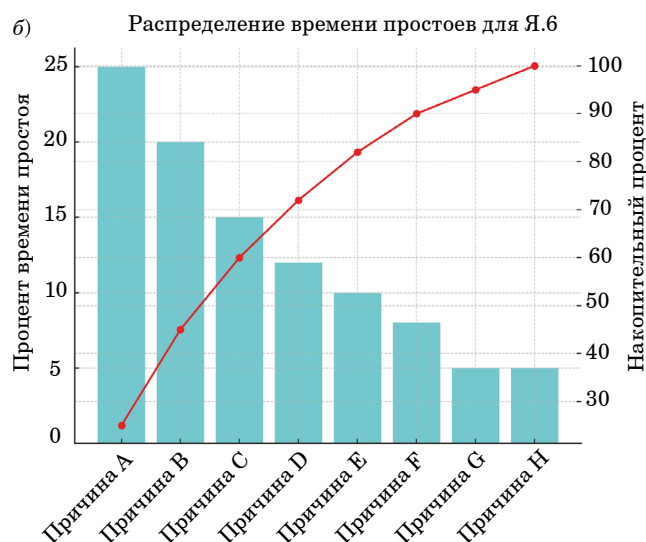
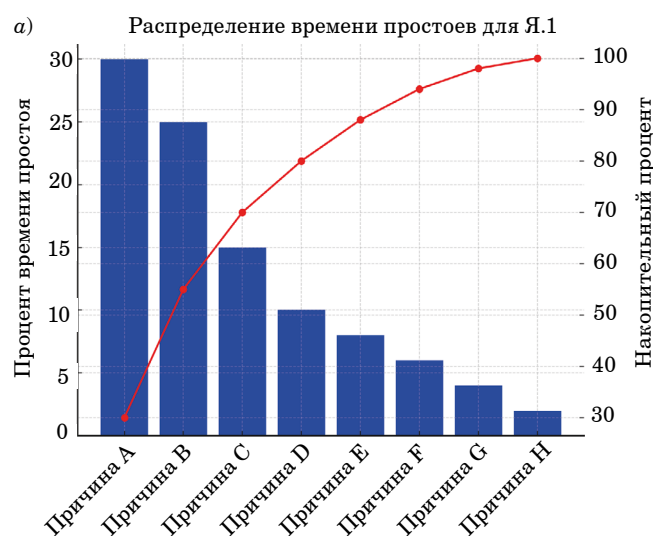
– причина D (Я.1) – замедление работы филлера, вызванное нестабильным давлением или неисправностями в системе подачи жидкости;

– причина E (Я.6) – брак продукции из-за неправильного наполнения или дефектов упаковки, вызванных сбоями в работе дозаторов;

– причина F (Я.6) – корректировки продукции из-за ошибок в упаковке или запечатывании;

– причина G и H – незначительные сбои, такие как временные задержки, сбои в подаче упаковочных материалов и мелкие остановки.

На рис. 3 видно, что для ячеек Я.1 и Я.6 было построено распределение времени простоев по причинам отказов. Причины отказов были классифицированы на основе данных, собранных системой сбора данных, и разделены на несколько основных категорий: запланированные и незапланированные остановки, потери скорости, а также ухудшение качества продукции. Также очевидно, что для ячейки Я.1 основными причинами простоев являются незапланированные остановки (причина В), а также снижение скорости конвейера (причина С). Для ячейки Я.6 наи-



- Рис. 3. Распределение времени простоев по причинам отказов для ячеек Я.1 (а) и Я.6 (б)
- Fig. 3. Distribution of downtime by failure causes for cells Я.1 (а) and Я.6 (б)

большие потери времени были связаны с браком продукции (причина E) и необходимостью корректировки упаковки (причина F).

Одним из ключевых показателей эффективности инвестиционных решений является оценка их потенциальной прибыли. Для этого важно учитывать все финансовые аспекты, включая затраты и ожидаемые доходы. Наиболее надежным методом является использование динамических подходов, таких как расчет чистой приведенной стоимости (ЧПС) и внутренней нормы доходности (ВНД). Эти методы позволяют учесть фактор времени, инфляцию и моменты поступления денежных средств.

Для оценки эффективности инвестиций в улучшение работы роботизированной линии розлива используем метод дисконтированных денежных потоков, позволяющий рассчитать внутреннюю норму доходности. Этот показатель определяется как ставка дисконтирования, при которой приведенная стоимость затрат равна приведенной стоимости доходов.

Процесс расчета состоит из нескольких этапов:

- 1) оценка чистых денежных потоков за каждый год инвестиционного периода;
- 2) прогнозирование индекса потребительских цен, который будет использоваться в качестве дисконтной ставки;
- 3) проверка налоговых ставок и амортизации;
- 4) численное определение внутренней нормы доходности.

При валидации модели производственной линии был использован ключевой показатель эффективности работы оборудования, который учитывает технические и организационные потери, снижение скорости работы, потери, связанные с чисткой оборудования и его переналадкой.

Для расчета данного показателя была предложена следующая формула:

$$\eta = \Pi / \text{И} \cdot 100 \%,$$

где η – общая эффективность использования оборудования; $\Pi = n/v_{\text{НОМ}}$ – время работы линии; n – количество обработанных единиц продукции; $v_{\text{НОМ}}$ – номинальная скорость работы оборудования (ед./мин);

$$\text{И} = \Pi + \text{В} + \text{М} + \text{О} + \text{ПН}$$

– время наработки на отказ, где В – потери времени из-за поломок; М – потери времени из-за микроостановок; О – потери времени на чистку оборудования; ПН – потери времени на переналадку оборудования.

Также используется показатель технической эффективности оборудования:

$$\text{ТЭ} = \Pi / (\Pi + \text{В} + \text{М}) \cdot 100 \%.$$

Этот показатель отражает только технические и организационные причины сбоев и микроостановок, что позволяет более точно оценивать факторы, влияющие на производительность.

Улучшение любого из этих показателей приведет к снижению времени простоев, что, в свою очередь, уменьшит затраты на рабочую силу, электроэнергию и обслуживание оборудования. При этом снижение брака продукции и сокращение затрат на техническое обслуживание также положительно скажутся на общей экономической эффективности.

В данном случае емкость буфера является одним из ключевых факторов при проектировании серийных производственных линий. Важность буферов заключается в том, что они позволяют компенсировать простои оборудования, вызванные техническим обслуживанием или неожиданными сбоями. Промежуточные буферы между различными ячейками производственной линии могут существенно повысить надежность всей системы, уменьшая влияние микроостановок и потери доступности оборудования.

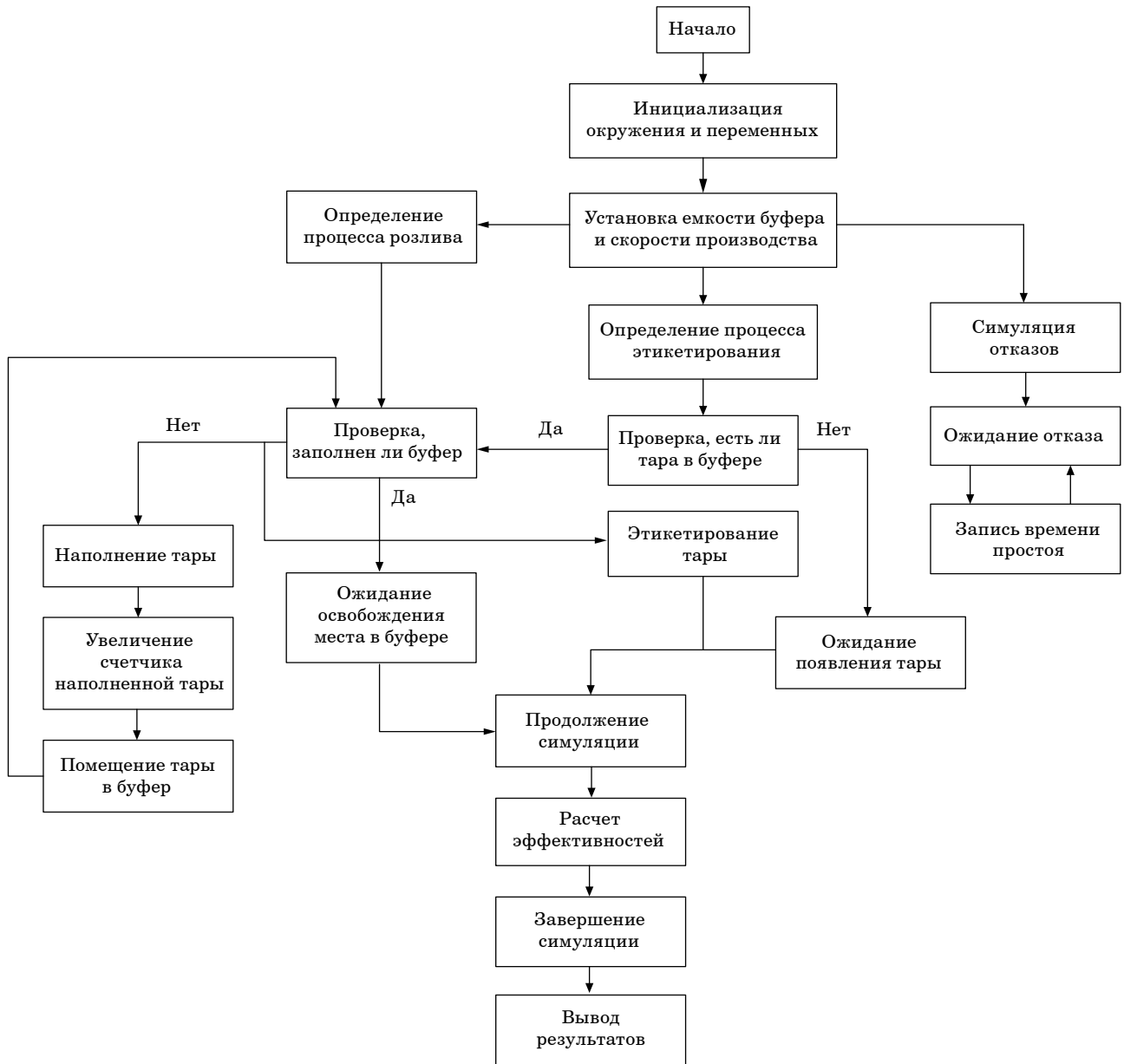
На рис. 4 показана блок-схема процесса моделирования производственной линии розлива напитков, включая обработку бутылок, управление буфером и учет поломок оборудования.

На исследуемой производственной линии буфер большой емкости находится между ячейкой розлива и ячейкой этикетирования. Его номинальная емкость составляет 486 бутылок, однако ее можно увеличить до 600 без значительных капитальных вложений. В случае необходимости расширения емкости буфера в условиях ограниченного пространства возможно использование вертикального буфера.

Для моделирования показанной на рис. 2 производственной линии розлива и оценки влияния буфера на производительность системы можно использовать библиотеку Python для дискретно-событийного моделирования, такую как SimPy. Данная библиотека позволяет реализовать основные процессы, происходящие на производственной линии, с учетом времени простоев, скорости работы оборудования, а также управления буферами между ячейками.

Модель, основанная на SimPy, моделирует работу роботизированной линии розлива напитков с учетом следующих процессов:

- процесс розлива (filling process): 1500 бутылок в минуту;



• Рис. 4. Блок-схема алгоритма симуляции представленной модели
 • Fig. 4. Block diagram of the simulation algorithm for the presented model

- процесс этикетирования (labeling process): 1400 бутылок в минуту;
 - поломки оборудования: модель включает в себя случайные сбои как в розливном оборудовании, так и в этикетировочной ячейке, с восстановлением после поломок;
 - буфер: между ячейками розлива и этикетирования находится буфер, емкость которого варьируется от 0 до 600 бутылок.
- Основные параметры модели:
- общее количество бутылок: 750 000 бутылок за симуляцию;
 - емкость буфера: может изменяться, в текущем сценарии – 600 бутылок;

- время между поломками для розливного оборудования: 200 мин;
 - время между поломками для этикетировочной ячейки: 180 мин;
 - время ремонта для розливного оборудования: 30 мин;
 - время ремонта для этикетировочного оборудования: 25 мин.
- Допущения к модели:
- 1) предполагается, что оборудование для розлива и этикетирования работает на постоянной скорости, за исключением времени, когда происходят сбои;
 - 2) поломки розливного и этикетировочного оборудования считаются независимыми друг от

друга, это означает, что сбои на одной ячейке не влияют на вероятность поломок в другой ячейке; хотя в реальности поломки могут быть связаны (например, из-за проблем с общей системой управления), это допущение делает модель проще и позволяет анализировать влияние каждой ячейки отдельно;

3) модель использует фиксированные параметры для времени между поломками (200 мин для розливного оборудования и 180 мин для этикетировочного) и времени ремонта (30 и 25 мин соответственно), эти значения не меняются в процессе симуляции. В реальных условиях продолжительность поломок и ремонта может варьироваться в зависимости от сложности неисправности, человеческого фактора и других условий;

4) емкость буфера считается ограниченной и фиксированной на уровне 600 бутылок. В реальной системе буфер может быть динамическим или адаптивным, изменяясь в зависимости от условий на линии, однако это допущение позволяет сфокусироваться на влиянии фиксированных значений буфера на производительность;

5) модель не учитывает человеческий фактор, такой как время реакции операторов, ошибки персонала и т. д., все ремонты начинаются немедленно после сбоя и завершаются в фиксированное время;

6) время симуляции ограничено до 500 мин, что приблизительно соответствует одной производственной смене. Это допущение позволяет моделировать краткосрочные сценарии и анализировать влияние параметров на работу линии в рамках одной смены;

7) в модели не учитываются внешние условия, такие как температура, влажность, которые могут влиять на работу оборудования и качество продукции;

8) модель предполагает, что все необходимые компоненты (бутылки, крышки, этикетки) всегда доступны и не возникает простоев из-за нехватки материалов;

9) в модели не учитываются изначальные, не зависящие от системы потери качества продукции, т. е. предполагается, что все используемые на линии бутылки соответствуют стандартам качества.

Описанные допущения помогают упростить модель и сконцентрироваться на ключевых аспектах – влиянии буфера и поломок на производительность линии розлива. Они, однако, также определяют границы применимости результатов симуляции. В реальных условиях для более точного анализа потребуется учесть дополнительные факторы, такие как вариативность времени

поломок, влияние внешних условий и человеческий фактор.

Симуляция работает на основе событийного подхода, где каждая операция – розлив, перемещение бутылки в буфер, этикетирование и сбой оборудования – является отдельным процессом, который взаимодействует с другими процессами на линии.

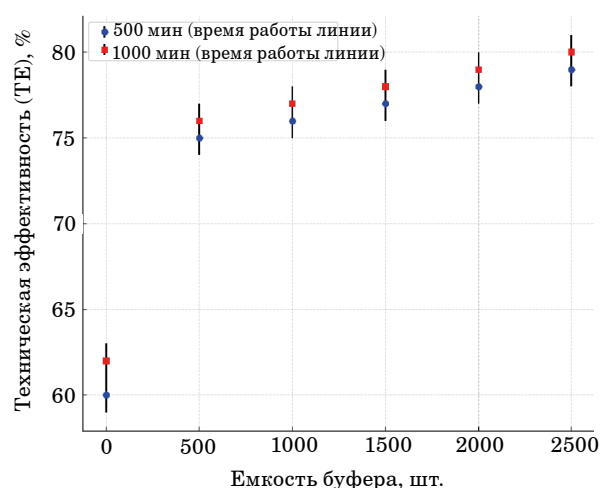
Симуляция моделирует три основных процесса ячеек.

1. Процесс розлива: отвечает за наполнение бутылок и отправку их в буфер.

2. Процесс этикетирования: отвечает за обработку бутылок из буфера на ячейке этикетирования.

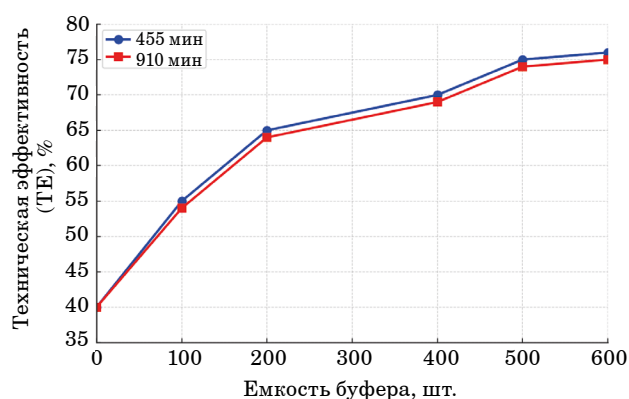
3. Процесс поломок: моделирует случайные поломки оборудования, которые вызывают простой и требуют ремонта.

На основании результатов симуляции, показанных на рис. 5, можно сделать вывод, что увеличение буферной емкости положительно влияет на техническую эффективность линии. При отсутствии буфера производительность падает до 40 %, однако при увеличении емкости до 500–600 бутылок система достигает максимальной эффективности на уровне 76–78 %, емкость буфера при этом в данной симуляции может быть еще увеличена, однако технически в рассматриваемой РЛР это нереализуемо без перестроения линии, при этом, исходя из результатов симуляции, видно, что дальнейшее увеличение буфера не оказывает значительного влияния на производительность, что указывает на оптимальный размер буфера для данной линии.



• Рис. 5. Диаграмма изменения технической эффективности в зависимости от емкости буфера в рассматриваемой симуляционной модели

• Fig. 5. Diagram of technical efficiency variation as a function of buffer capacity in the considered simulation model



• Рис. 6. Экспериментальные измерения зависимости технической эффективности от емкости буфера на исследуемой линии (рис. 2)

• Fig. 6. Experimental measurements of the dependence of technical efficiency on buffer capacity in the investigated line (fig. 2)

Для подтверждения результатов симуляции были проведены реальные эксперименты на производственной линии, данные которых приведены на рис. 6. График показывает зависимость технической эффективности (ТЭ) от емкости буфера для двух сценариев: продолжительность работы линии – 455 мин (одна смена) и 910 мин (две смены). Как видно из рис. 6, экспериментальные данные соответствуют результатам симуляции, демонстрируя аналогичный рост ТЭ с увеличением емкости буфера.

Заключение

В рамках проведенного исследования была разработана симуляционная модель роботизированной линии розлива напитков на основе дискретного событийного моделирования, целью которой было оценить ее техническую эффективность и предложить пути для оптимизации производственного процесса. Полученные результа-

ты, как симуляционные, так и экспериментальные, позволяют утверждать, что буфер емкостью 500–600 бутылок является оптимальным для исследуемой линии. Увеличение буфера до этого уровня приводит к значительному росту технической эффективности, достигая показателей в 76–78 %. При дальнейшем увеличении емкости буфера эффективность стабилизируется, что подтверждает необходимость поиска компромисса между производительностью и затратами на увеличение емкости.

Экспериментальные данные, полученные на реальной производственной линии, подтвердили результаты симуляции. Это доказывает, что предложенная модель адекватно описывает поведение системы и может быть использована для прогнозирования и оптимизации производственных процессов. Кроме того, идентификация «узких» мест, таких как работа станции розлива и этикетирования, позволяет сосредоточить усилия на улучшении работы именно этих критических участков [13, 14].

Применение предложенной модели на практике позволит не только повысить эффективность производственных линий, но и уменьшить операционные затраты.

Несмотря на успех проведенного исследования, необходимо отметить некоторые ограничения. В первую очередь, модель не учитывает вариабельность времени между поломками и времени на их устранение, что может варьироваться в реальных условиях. В дальнейшем возможно расширение модели с учетом стохастической природы этих процессов. Также важно учитывать внешние условия, такие как температура или влажность, которые могут оказывать влияние на производительность оборудования. В реальных условиях человеческий фактор также играет значимую роль, однако его влияние не было подробно рассмотрено в данном исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасова И. А., Дробитько А. В. Усовершенствование системы автоматического управления технологическим процессом в производстве пищевой промышленности // Проблемы искусственного интеллекта. 2018. Т. 3, № 10. С. 112–121.
2. Компьютерная модель и комплектация линии по производству безалкогольного напитка функционального назначения / Л. В. Гнетько, М. М. Удычак, Б. Б. Сяхова, С. А. Гишева // Новые технологии. 2020. № 6. С. 20–27.
3. Мешков А. В., Громов В. С. Формирование траектории цифрового двойника многосвязного механизма с использованием адаптивного алгоритма оценки параметров нелинейного движения // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 889–895.
4. Кузьмина Е. В., Шевченко С. А., Шокурова Д. В. Технология виртуальной фабрики, как тренд развития предприятия в условиях цифровой экономики // Экономика и бизнес: теория и практика. 2024. Т. 3–1, № 109. С. 196–198. Doi: 10.24412/2411–0450–2024–3–1–196–198.

5. Солодилова Н. А., Уба С. С., Емельянов А. А. Системный подход при использовании цифровых технологий в машиностроении // Системный анализ в проектировании и управлении. 2024. Т. XXVII, № 1. С. 358–364. Doi: 10.18720/SPBPU/2/id24–60.
6. Шарашкина Т. П. Организация проведения функционально-стоимостного анализа производственного процесса на предприятии // Эконом. анализ: теория и практика. 2014. Т. 40, № 390. С. 41–47.
7. Квас Е. С., Кузьменко В. П. Повышение гибкости сборочной линии бытовых светодиодных ламп с помощью анализа сети Петри // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 6 (144). С. 90–92.
8. Ramírez-Granados M., Hernández J. E., Lyons A. C. A discrete-event simulation model for supporting the first-tier supplier decision-making in a UK's automotive industry // Journal of applied research and technology. 2014. Vol. 12, № 5. P. 860–870. Doi: 10.1016/S1665–6423(14)70592–9.
9. Velumani S., Tang H. Operations status and bottleneck analysis and improvement of a batch process manufacturing line using discrete event simulation // Procedia manufacturing. 2017. Vol. 10. P. 100–111. Doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.033.
10. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. Simultaneous allocation of buffer capacities and service times in unreliable production lines // International journal of production research. 2024. Vol. 62, № 3. P. 644–664.
11. Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф. Динамический анализ двухзвенной связанной системы // International journal of open information technologies. 2024. Vol. 12, № 5. P. 49–56.
12. Сырецкий Г. А. Робототехника и автоматизация производства: современное состояние // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5, № 2. С. 24–29.
13. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. Buffer allocation design for unreliable production lines using genetic algorithm and finite perturbation analysis // International journal of production research. 2021. Vol. 59, № 20. P. 3001–3017. Doi: 10.1080/00207543.2021.1909169.
14. Wu C.-W., Lee A. H. I., Huang Y.-S. Developing a skip-lot sampling scheme by variables inspection using repetitive sampling as a reference plan // International journal of production research. 2021. Vol. 59, № 21. P. 3018–3030. Doi: 10.1080/00207543.2021.1909768.

REFERENCES

1. Tarasova I. A., Drobitko A. V. Improvement of the automatic control system of the technological process in the food industry. Problems of artificial intelligence. 2018;3(10):P. 112–121. (In Russ.).
2. Gnetko L. V., Udychak M. M., Siyukhova B. B., Gisheva S. A. Computer model and equipment of a line for the production of a functional soft drink. New technologies. 2020;(6):20–27. (In Russ.).
3. Meshkov A. V., Gromov V. S. Formation of the trajectory of a digital twin of a multi-link mechanism using an adaptive parameter estimation algorithm for nonlinear motion. Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics. 2022;22(5):889–895. (In Russ.).
4. Kuzmina E. V., Shevchenko S. A., Shokurova D. V. The technology of the virtual factory as a trend in enterprise development in the digital economy. Economics and business: theory and practice. 2024;3–1(109):196–198. (In Russ.). Doi: 10.24412/2411–0450–2024–3–1–196–198.
5. Solodilova N. A., Uba S. S., Emelyanov A. A. System approach to the use of digital technologies in mechanical engineering. System analysis in design and management. 2024;XXVII(1):358–364. (In Russ.). Doi: 10.18720/SPBPU/2/id24–60.
6. Sharashkina T. P. Organization of functional cost analysis of the production process at an enterprise. Economic analysis: theory and practice. 2014;40(390):41–47. (In Russ.).
7. Kvas E. S., Kuzmenko V. P. Increasing the flexibility of the assembly line for household LED lamps using Petri net analysis. Science and business: development paths. 2023;6(144):90–92. (In Russ.).
8. Ramírez-Granados M., Hernández J. E., Lyons A. C. A discrete-event simulation model for supporting the first-tier supplier decision-making in a UK's automotive industry. Journal of applied research and technology. 2014;12(5):860–870. Doi: 10.1016/S1665–6423(14)70592–9.
9. Velumani S., Tang H. Operations status and bottleneck analysis and improvement of a batch process manufacturing line using discrete event simulation. Procedia manufacturing. 2017;10:100–111. Doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.033.
10. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. Simultaneous allocation of buffer capacities and service times in unreliable production lines. International journal of production research. 2024;62(3):644–664.
11. Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun S. F. Dynamic analysis of a two-link coupled system. International journal of open information technologies. 2024;12(5):49–56. (In Russ.).
12. Syretsky G. A. Robotics and production automation: modern state. Interexpo Geo-Siberia. 2017;5(2):24–29. (In Russ.).

13. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. Buffer allocation design for unreliable production lines using genetic algorithm and finite perturbation analysis. *International journal of production research*. 2021;59(20):3001–3017. Doi: 10.1080/00207543.2021.1909169.
14. Wu C.-W., Lee A. H. I., Huang Y.-S. Developing a skip-lot sampling scheme by variables inspection using repetitive sampling as a reference plan. *International journal of production research*. 2021;59(21):3018–3030. Doi: 10.1080/00207543.2021.1909768.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Квас Евгений Станиславович, старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – промышленная робототехника, анализ данных, симуляционное моделирование, машинное обучение, контроль качества и оптимизация производственных процессов роботизированных линий производства серийной продукции.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.

Кузьменко Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электротехника, светодиодное освещение, энергоснабжение, качество электрической энергии, цифровая энергетика, цифровая релейная защита, преобразовательная электроника.

Поступила в редакцию 25.09.2024

Поступила после рецензирования 27.09.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Kvas Evgeny S., Senior Lecturer at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – industrial robotics, data analysis, simulation modeling, machine learning, quality control, and optimization of production processes in robotic production lines for mass production.

Solyonyj Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of power systems, information security, technological entrepreneurship, artificial intelligence.

Kuzmenko Vladimir P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electrical engineering, LED lighting, power supply, quality of electric energy, digital power engineering, digital relay protection, converter electronics.

Received 25.09.2024

Revised 27.09.2024

Accepted 10.10.2024

Диссипативность в организационных системах: показатели и проблемы измерения

Станислав Анатольевич Назаревич¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036, SPIN-код: 7136-4599

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время формирование устойчивых организационных систем – залог общей конкурентоспособности. Рассматриваются вопросы измерения признаков диссипативности организационных систем, которые позволяют увеличить степень открытости существующих структур управления предприятиями путем понимания природы и механизмов управления изменениями, находясь под внутренними и внешними вызовами. Также исследуются возможности нивелирования проблем, связанных с измерением признаков диссипативности.

Ключевые слова: диссипативные системы, организационные системы, признаки, проблемы, измерения, внешние вызовы

Для цитирования: Назаревич С. А. Диссипативность в организационных системах: показатели и проблемы измерения // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 23–26. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-23-26.

Original article

Dissipativity in organizational systems: indicators and measurement problems

Stanislav A. Nazarevich¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036, SPIN-code: 7136-4599

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Nowadays, the formation of sustainable organizational systems is the key to overall competitiveness. The article deals with the issues of measuring the signs of dissipativity of organizational systems, which allow to increase the degree of openness of existing management structures of enterprises, by understanding the nature and mechanisms of change management, being under internal and external challenges. As well as explores the possibilities of leveling the problems associated with measuring the signs of dissipativity.

Keywords: dissipative systems, organizational systems, attributes, problems, measurements, external challenges

For citation: Nazarevich S. A. Dissipativity in organizational systems: indicators and measurement problems. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):23–26. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-23-26.

Диссипативность [1] организационных систем заключается в появлении неэффективных процессов, связанных с несогласованным взаимодействием подразделений как на разных уровнях иерархической пирамиды управления, так и на линейном горизонтальном уровне в рамках общей цепочки создания ценности.

Проблемы восприятия современных организационных систем в рамках их основной целевой функции заключаются в том, что, в зависимости от масштаба осуществляемой производственной функции, появляется видение либо продуктового механизма, либо финансового механизма, имеющего окончательную результативность, выраженную в виде либо количественно определенной партии изделий, либо финансового ресурса [2], который появляется после отгрузки партии из-

делий на склад заказчика. Общее видение диссипативности организационной системы подразумевает наличие четко выверенной робастности, обеспеченной процессами создания ценности [3], включающими в себя персонал, оборудование, материал и общую производственную инфраструктуру, имеющую общую невосприимчивость к внутренним и внешним факторам среды.

Существует точка зрения, что факторы внешней среды могут оказывать направленные вызовы в виде количественно определенных воздействий в экономической, технологической, географической средах, тогда набор управленческих и технических рисков увеличивается до такой степени, что происходит формирование общего вызова, приводящего систему в состояние неуправляемости.

И в данном контексте появляется суждение о формировании «системы систем», т. е. возникновении внутри общей локализованной организационной структуры на основании организационных патологий подсистемы, которая оттягивает на себя ресурсы производственной инфраструктуры и вызывает дополнительные внутренние воздействия на ценностные процессы путем увеличения общей энтропии.

Рассмотрим основные аспекты диссипативности в организационных системах.

1. *Определение диссипативности.* В системной теории диссипативные [1] системы – это открытые системы, которые обмениваются энергией и веществом с окружающей средой, поддерживая свое существование за счет постоянного потока ресурсов. В организационном контексте диссипативность может проявляться через неэффективные процессы, что приводит к потере времени, ресурсов и энергии.

2. *Проблемы измерения.* Измерение диссипативности в организационных системах представляет собой сложную задачу по нескольким причинам:

– мультидисциплинарный подход, когда необходимо учитывать множество факторов – экономические, социальные, культурные и технологические. Это усложняет процесс сбора и анализа данных;

– качественные и количественные параметры. Диссипативность может проявляться как в количественных потерях (ресурсные потери, финансовые, временные потери), так и в качественных аспектах (снижение морального духа сотрудников, ухудшение коммуникации);

– кросс-функциональные взаимодействия. Эффекты диссипативности могут выделяться на различных уровнях и в разных подразделениях, что требует комплексного подхода к оценке потерь и мониторингу общей структурной иерархии и контролю функциональных связей;

– динамика изменений. Организационные системы являются динамичными, и оценка диссипативных процессов требует учета изменений во времени.

Для управления процессами мониторинга и отслеживания признаков возникновения диссипативности в организационных системах необходимо проанализировать и определить методы оценки и управления степенью диссипативности. Для этого необходимо провести непосредственный мониторинг процессов создания ценности, определить «узкие» места не только в производственных системах, но и отследить общие функциональные связи на предмет возникновения дрейфа ресурсности внутри структурных подраз-

делений и отсутствия признаков излишней бюрократии, вызванной либо сговором, либо нарушением организационного порядка.

Достаточно хорошим решением будет разработать ключевые показатели эффективности для каждого из подразделений на предмет анализа признаков успешности и состояния мотивированности персонала исследуемой организационной системы.

Методы оценки и управления степенью диссипативности:

1) анализ процессов – использовать методы картирования процессов для выявления «узких» мест и потерь в ресурсах;

2) ключевые показатели эффективности (KPI) – разработка KPI, которые акцентируют внимание на эффективности процесса и расходах ресурсов;

3) обратная связь и корректировка – регулярное получение отзывов от сотрудников и клиентов поможет выявить области, где могут проявляться потери;

4) инновации и технологии – внедрение современных технологий и методов управления (например, Agile, Lean) может помочь снизить уровень диссипативности;

5) обучение и развитие – инвестиции в обучение и развитие сотрудников, что поможет повысить общую производительность и снизить потери.

Правильное понимание и управление диссипативностью в организационных системах может привести к более эффективной работе и оптимизации ресурсов, что, в свою очередь, улучшит результаты работы и повысит конкурентоспособность организации [2].

Современные организационные системы функционируют в условиях постоянной неопределенности, что требует от них гибкости и способности к адаптации. Диссипативные системы способны поддерживать порядок и организованность в условиях внешних воздействий благодаря внутренним механизмам самоорганизации. Это делает данную концепцию особенно актуальной для изучения организационных систем, которые стремятся к устойчивому развитию.

В организационных системах диссипативность проявляется через:

1) взаимодействие между элементами структуры;

2) обмен информацией и ресурсами;

3) способность организации адаптироваться к изменяющимся условиям.

Существует множество подходов к определению диссипативности, что затрудняет ее измерение. В рамках менеджмента и организационной

теории концепция диссипативности может трактоваться по-разному, что приводит к нечеткости в оценочных критериях. Многие аспекты диссипативности сложно поддаются количественной оценке. Например, инновационные процессы или уровень командной работы можно оценить лишь частично, используя опросные методы или экспертные оценки, по причине сложноструктурированного набора критериев еще не установленного и не апробированного типа. Внешние условия, такие как экономическая ситуация, законодательство и социальные факторы, оказывают значительное влияние на организационные процессы. Это делает трудным изолированное измерение диссипативности, так как ее проявления зависят от множества переменных.

Перечислим возможные подходы к решению проблем измерения.

1. Разработка комплексных моделей [4]. Для решения проблемы многообразия определений может быть полезно разработать комплексную модель, которая объединяет различные аспекты диссипативности и учитывает специфику конкретной организации.

2. Использование смешанных методов исследования. Смешанные методы, включающие в себя как количественные, так и качественные подходы, могут дать более объемную картину диссипативности в организациях.

3. Создание индикаторов. Разработка индикаторов, отражающих ключевые аспекты диссипативных процессов, таких как инновационная активность, инновационное поведение [5], уровень вовлеченности сотрудников и т. д., может помочь в количественной оценке.

Отдельно нужно рассмотреть показатели инновационного поведения как метрики для измерения потенциала персонала. Инновационное поведение организаций является ключевым фактором их успешного функционирования и конкурентоспособности в современных быстро-

меняющихся условиях рынка. Показатели инновационного поведения помогают определить степень готовности компании к внедрению новых технологий и процессов, а также их способность осуществлять инновационные изменения.

Показатели инновационного поведения можно классифицировать на несколько групп:

1) аналитические показатели – включают в себя количество разработанных и внедренных инноваций, затраты на исследования и разработки (R&D), долю инновационных продуктов в общем объеме продаж;

2) качественные показатели – определяют степень инновационного мышления сотрудников, открытость компании к новым идеям и технологиям, уровень сотрудничества с внешними партнерами и научными учреждениями;

3) организационные показатели – касаются структуры компании, наличия специализированных подразделений для работы с инновациями, системы поощрения и мотивации работников за внедрение инновационных идей.

Диссипативность является важным аспектом для понимания динамики организационных систем в условиях кризиса и быстрого изменения внешней среды. Однако измерение этого явления представляет собой сложную задачу. Будущие исследования должны сосредоточиться на разработке более точных методов и инструментов для оценки диссипативности, что позволит организациям лучше справляться с вызовами современности.

Диссипативность в организационных системах представляет собой важную концепцию, позволяющую объяснить механизмы адаптации и устойчивости в условиях изменений. Применяя принципы диссипативных структур, организации могут улучшить свою способность к инновациям, повысить качество управления рисками и развивать внутреннюю культуру, способствующую сотрудничеству и самоорганизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Мальшев Ю. А.* Диссипативные структуры и теоретические основы управления инновационной сферой региона // Вестн. ПГУ. Сер.: Экономика. 2010. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dissipativnye-struktury-i-teoreticheskie-osnovy-upravleniya-innovatsionnoy-sferoy-regiona> (дата обращения: 23.09.2024).
2. *Тронина И. А.* Управление инновационным развитием в интегрированных образованиях с учетом ключевых факторов современной экономики // Известия ТулГУ. Эконом. и юрид. науки. 2015. № 4-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-innovatsionnym-razvitiem-v-integrirovannyh-obrazovaniyah-s-uchetom-klyuchevyh-faktorov-sovremennoy-ekonomiki> (дата обращения: 23.09.2024).
3. *Винниченко А. В.* Исследование детерминант норм управляемости для систем мониторинга уровня качества технологических процессов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. ст. V Междунар. форума / под ред. В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2023. С. 209–210.

4. Назаревич С. А., Меркулова А. Ю. Марковские цепи для решения проблем управления технологическим процессом в производственной системе // Системный анализ и логистика. 2023. № 1 (35). С. 67–73.
5. Назаревич С. А. Показатели инновационного поведения для мониторинга состояния готовности организационной системы к проведению изменений // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. 2023. Т. 21, № 1. С. 126–133.

REFERENCES

1. Malyshev Yu. A. Dissipative structures and theoretical foundations of management of the innovative sphere of the region. Vestnik of PSU. Series: Economics. 2010;(3). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/dissipativnye-struktury-i-teoreticheskie-osnovy-upravleniya-innovatsionnoy-sferoy-regiona> [Accessed 23 September 2024].
2. Tronina I. A. Management of innovative development in integrated formations taking into account the key factors of modern economy. Izvestiya TulsU. Economic and Legal Sciences. 2015;(4-1). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-innovatsionnym-razvitiem-v-integrirrovannyh-obrazovaniyah-s-uchetom-klyuchevyh-faktorov-sovremennoy-ekonomiki> [Accessed 23 September 2024].
3. Vinnichenko A. V. Research of determinants of controllability norms for systems of monitoring the level of quality of technological processes. Metrological support of innovative technologies. Collection of articles of the V International forum; eds by V. V. Okrepilov. SPb.: SUAI; 2023, pp. 209–210. (In Russ.).
4. Nazarevich S. A., Merkulova A. Yu. Markov chains for solving the problems of technological process control in the production system. System analysis and logistics. 2023;(1(35)):67–73. (In Russ.).
5. Nazarevich S. A. Indicators of innovative behavior for monitoring the state of readiness of the organizational system to make changes. Vestnik Magnitogorskogo G. I. Nosov State Technical University. 2023;21(1):126–133. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Назаревич Станислав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оценка степени новизны инновационной продукции, квалиметрическая оценка, управление процессами.

Поступила в редакцию 24.09.2024

Поступила после рецензирования 27.09.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Nazarevich Stanislav A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – evaluation of the degree of novelty of innovative products, qualimetric evaluation, process management.

Received 24.09.2024

Revised 27.09.2024

Accepted 10.10.2024

Эвристические модели в организационном дизайне для проектирования бережливого производства

Елена Андреевна Пашина¹

elenapashina-03@mail.ru, orcid.org/0009-0001-3986-9243, SPIN-код: 8955-1860

Станислав Анатольевич Назаревич¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036, SPIN-код: 7136-4599

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В современных условиях глобальной конкуренции предприятиям необходимо стремиться к повышению эффективности производственных процессов. Бережливое производство (Lean Production) становится одной из ключевых концепций, способствующих минимизации затрат, улучшению качества продукции и сокращению сроков производства. Одним из перспективных подходов к проектированию и внедрению бережливого производства является использование эвристических моделей в организационном дизайне. Рассматриваются основные принципы эвристического подхода, его роль в организационном дизайне и влияние на построение эффективных систем бережливого производства.

Ключевые слова: эвристические модели, организационный дизайн, бережливое производство

Для цитирования: Пашина Е. А., Назаревич С. А. Эвристические модели в организационном дизайне для проектирования бережливого производства // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 27–30. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-27-30.

Original article

Heuristic models in organizational design for lean manufacturing design

Elena A. Pashina¹

elenapashina-03@mail.ru, orcid.org/0009-0001-3986-9243, SPIN-code: 8955-1860

Stanislav A. Nazarevich¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036, SPIN-code: 7136-4599

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. In the current environment of global competition, enterprises need to strive to improve the efficiency of production processes. Lean Production is becoming one of the key concepts that contribute to minimizing costs, improving product quality and reducing production time. One of the promising approaches to the design and implementation of Lean Production is the use of heuristic models in organizational design. This article discusses the basic principles of the heuristic approach, its role in organizational design and its impact on the construction of effective lean manufacturing systems.

Keywords: heuristic models, organizational design, Lean Production

For citation: Pashina E. A., Nazarevich S. A. Heuristic models in organizational design for lean manufacturing design. Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(5):27–30. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-27-30.

Введение

В условиях глобализации предприятия сталкиваются с необходимостью постоянно повышать эффективность своих производственных процессов. Одним из подходов, который активно используется для достижения этой цели, является применение системы, направленной на сокращение затрат, улучшение качества и ускорение производства. Этот подход, известный своей эффективностью, требует от компаний не только пересмотра существующих методов работы, но и

внедрения новых инструментов для управления и оптимизации процессов [1].

Одним из таких инструментов являются простые, но действенные методы, которые помогают быстро находить решения для улучшения работы. Эти методы основаны на практическом опыте и здравом смысле и позволяют предприятиям принимать решения, не тратя много времени на действия, не приносящие ценность. Использование таких методов может помочь улучшить организацию работы на предприятиях и сделать их производственные процессы более эффективными.

Метод поиска решений на основе интуиции, опыта и неполных данных представляет собой упрощенные правила или принципы, которые позволяют находить оптимальные или удовлетворительные решения в критических ситуациях без необходимости в полном анализе всех возможных вариантов [2, 3]. В контексте бережливого производства эвристики используются для быстрого выявления проблем и поиска решений, направленных на улучшение процесса.

Процесс проектирования структуры компании, ее процессов, систем и ролей для достижения стратегических целей направлен на создание структуры, которая будет способствовать минимизации потерь, оптимизации использования ресурсов и повышению гибкости процессов. Эвристические модели в этом контексте представляют собой набор правил, направленных на оптимизацию организационных решений [4].

Применение эвристик для решения проблем

В бережливом производстве важно постоянно выявлять и устранять действия, не приносящие ценность процессу. Эвристики предоставляют гибкие решения для быстрого обнаружения проблем и их устранения.

В таблице приведены ключевые эвристические модели, применяемые в рамках бережливого производства, а также показана их роль в оптимизации производственных процессов. Эти эвристики играют ключевую роль в построении гибких и эффективных систем управления производством, помогая организациям выявлять и устранять потери, улучшать потоки и повышать качество продукции [4–7]. Взаимосвязь между эвристическими подходами и основными аспектами бережливого производства иллюстрирует, как эвристики могут применяться для решения

- *Применение эвристических моделей в бережливом производстве*
- *Application of heuristic models in lean manufacturing*

Эвристика	Описание	Применение в бережливом производстве	Ожидаемый результат
«5 почему»	Метод последовательного выявления коренной причины проблемы путем пятикратного «почему»	Используется для анализа проблем в процессах, выявления источников ошибок и дефектов	Устранение коренных причин проблем, повышение стабильности процессов
Рока – Yoке	Принцип проектирования процессов, исключающий возможность совершения ошибок	Автоматическое предотвращение или выявление ошибок в производственных процессах	Снижение дефектов и брака, улучшение качества продукции
Just-in-Time	Эвристика, предполагающая подачу материалов и выполнение работ в нужное время и нужном количестве	Оптимизация складских запасов, устранение перепроизводства и избыточных запасов	Сокращение запасов, улучшение потоков, снижение затрат на хранение и транспортировку
Канбан	Визуальная система управления потоком, которая сигнализирует о необходимости пополнения ресурсов	Контроль производственного процесса для предотвращения простоев и оптимизации потоков	Снижение потерь от ожидания, улучшение потока материалов и информации
«5S»	Система организации рабочего пространства, основанная на пяти принципах (сортировка, соблюдение порядка и т. д.)	Оптимизация рабочего места и снижение потерь времени и движения	Повышение производительности и снижение излишних движений
Kaizen	Принцип непрерывного улучшения, основанный на малых, но постоянных улучшениях	Вовлечение сотрудников в процесс постоянного улучшения всех аспектов производства	Постоянное повышение качества, эффективности и гибкости организации
Теория ограничения	Метод, направленный на выявление «узких» мест в системе и их оптимизацию для улучшения всей системы	Фокусировка на ключевых ограничениях, влияющих на производительность процесса	Устранение «узких» мест, увеличение пропускной способности и снижение задержек

конкретных задач, связанных с оптимизацией ресурсов, минимизацией дефектов и ускорением процессов.

Данные таблицы наглядно демонстрируют, что эвристические модели являются неотъемлемым инструментом в проектировании и реализации бережливого производства. Каждая эвристика фокусируется на определенных аспектах оптимизации – от улучшения качества до снижения затрат и времени на выполнение операций. Применение этих моделей способствует созданию устойчивой и эффективной производственной системы, где процессы постоянно улучшаются, а потери минимизируются [8]. Таким образом, эвристики помогают не только решать конкретные проблемы, но и поддерживать культуру непрерывного улучшения на предприятии.

Применение эвристических моделей оказывает значительное влияние на внутреннюю культуру организации. Эти подходы поддерживают вовлечение сотрудников на всех уровнях в процесс улучшений, что создает атмосферу доверия и ответственности.

Современные предприятия часто сталкиваются с внешней неопределенностью – изменениями в экономической ситуации, колебаниями спроса или новыми технологическими вызовами. В этих условиях эвристические модели оказываются особенно полезными, так как они позволяют быстро адаптироваться к изменяющимся обстоятельствам. Их простота и гибкость делают их эффективным инструментом в ситуациях, где традиционные аналитические подхо-

ды могут оказаться слишком медленными или дорогостоящими [9].

Используя эвристики, компании могут оперативно выявлять проблемы и находить практические решения, что особенно важно при необходимости быстрого реагирования на изменения рыночной среды. Эвристические модели, направленные на выявление и устранение потерь, помогают предприятиям сохранить конкурентоспособность даже в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов. В результате такие подходы способствуют не только краткосрочной оптимизации, но и долгосрочной устойчивости бизнеса, создавая основу для успешного развития в условиях постоянных изменений.

Заключение

Эвристические модели выполняют ключевую функцию в проектировании и внедрении бережливого производства, позволяя предприятиям находить быстрые и эффективные решения для оптимизации процессов. Применение эвристических подходов в организационном дизайне способствует повышению гибкости, сокращению времени принятия решений и снижению потерь на всех этапах производства. Внедрение эвристики не только помогает решать текущие проблемы, но и способствует непрерывному улучшению процессов, что делает их незаменимым инструментом в условиях современного конкурентного рынка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Назаревич С. А., Винниченко А. В. Проблемы и ошибки при организации производства, решаемые методологией бережливого производства // Системный анализ и логистика. 2021. № 4 (30). С. 49–56.
2. Адаптация элементов бережливого производства под внутреннюю среду предприятий / М. Ю. Рудюк, С. В. Чекайкин, З. Р. Дасаева, С. Э. Сенина // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 4 (118). С. 18–26.
3. Туккель И. Л. Методы и инструменты управления инновационным развитием промышленных предприятий. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 209 с.
4. Глашкина В. С., Цыплов Е. А., Бережливое производство и производство точно в срок // Форум молодых ученых. 2021. № 4 (56). С. 114–116.
5. Колесника О. Н., Локтионова Ю. Н. Управленческие инновации и инструменты их внедрения в управление организацией // Вестн. Курской гос. сельскохозяй. акад. 2009. № 6. С. 40–43.
6. Пономарева О. С. Бережливое производство как основа эффективного внедрения цифровизации в управлении производством. Современный менеджмент: теория и практика. Магнитогорск, 2021. С. 93–97.
7. Пашина Е. А., Назаревич С. А. Управление изменениями и инновациями в организации: подходы и инструменты // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: в 2 ч. Ч. 2. 2023. С. 201–203.
8. Digital-twin-based improvements to diagnosis, prognosis, strategy assessment, and discrepancy checking in a nearly autonomous management and control system / L. A. Lin [et al.] // Annals of nuclear energy. Vol. 166, № 108715.
9. Винниченко А. В. Тактика проектирования бережливых производственных систем // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 18–21.

REFERENCES

1. Nazarevich S. A., Vinnichenko A. V. Problems and errors in the organization of production solved by the methodology of lean production. System analysis and logistics. 2021;(4(30)):49–56. (In Russ.).
2. Rudyuk M. Yu., Dasaeva Z. R., Senina S. E. Adaptation of elements of lean production to the internal environment of enterprises. Science and business: ways of development. 2021;(4(118)):18–26. (In Russ.).
3. Tukkel I. L. Methods and tools for managing the innovative development of industrial enterprises. SPb.: BHV-Petersburg; 2013. 209 p. (In Russ.).
4. Glashkina V. S., Tsyplov E. A., Lean production and just-in-time production. Forum of young scientists. Young scientists forum. 2021;(4(56)):114–116. (In Russ.).
5. Kolesnika O. N., Loktionova Y. N. Managerial innovations and tools for their implementation in organization management. Vestnik Kursk State Agricultural Academy. 2009;(6):40–43. (In Russ.).
6. Ponomareva O. S. Lean production as a basis for effective implementation of digitalization in production management. Modern management: theory and practice. Magnitogorsk; 2021, pp. 93–97. (In Russ.).
7. Pashina E. A., Nazarevich S. A. Management of changes and innovations in the organization: approaches and tools. Mathematical methods and models in high-tech production: in 2 parts. P. 2. 2023, pp. 201–203. (In Russ.).
8. Lin L. A. et al. Digital-twin-based improvements to diagnosis, prognosis, strategy assessment, and discrepancy checking in a nearly autonomous management and control system. Annals of nuclear energy. Vol. 166, no. 108715.
9. Vinnichenko A. V. Tactics of designing lean production systems. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(2):18–21. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2024-2-18-21.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пашина Елена Андреевна, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – процесс разработки и внедрения новаторских и революционных идей, концепций, продуктов или услуг.

Назаревич Станислав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оценка степени новизны инновационной продукции, квалиметрическая оценка, управление процессами.

Поступила в редакцию 27.09.2024

Поступила после рецензирования 02.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Pashina Elena A., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – the process of development and implementation of innovative and revolutionary ideas, concepts, products or services.

Nazarevich Stanislav A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – evaluation of the degree of novelty of innovative products, qualimetric evaluation, process management.

Received 27.09.2024

Revised 02.10.2024

Accepted 10.10.2024

Отечественные роботы-манипуляторы: анализ готовности производства и перспективы развития

Павел Андреевич Сергеев¹

✉ Pas7@bk.ru, SPIN-код: 9348-1560

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-код: 3957-5891, Author ID: 910148

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Целью исследования является выявление тенденций развития отечественного производства роботов-манипуляторов. Рассмотрены планы России по вхождению в число 25 стран по уровню плотности роботизации, проведена оценка этих планов. Представлен обзор наиболее известных производителей отечественных роботов-манипуляторов, оценены возможности этих предприятий поддерживать увеличение объемов производства, выделены лидеры, способные обеспечить дорогостоящие разработки и располагающие значительными производственными мощностями.

Ключевые слова: робот-манипулятор, производство роботов, отечественное производство, импортозамещение, робототехника, коллаборативные роботы

Для цитирования: Сергеев П. А., Солёный С. В. Отечественные роботы-манипуляторы: анализ готовности производства и перспективы развития // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 31–36. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-31-36.

Original article

Domestic robotic arms: analysis of production readiness and development prospects

Pavel A. Sergeev¹

✉ Pas7@bk.ru, SPIN-code: 9348-1560

Sergey V. Solyonyj¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-code: 3957-5891, Author ID: 910148

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is to identify trends in the development of domestic production of robotic arms. The article indicates the goals of Russia's appearance in the 25 leader countries. An overview of the most famous domestic manufacturers of robotics arms is presented. The possibilities of these enterprises in production are shown. The leaders enterprises are highlighted having ability to provide expensive research and development and have significant production capacities.

Keywords: robotic arms, robot manufacturing, domestic production, import substitution, robotics, collaborative robots

For citation: Sergeev P. A., Solyonyj S. V. Domestic robotic arms: analysis of production readiness and development prospects. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):31–36. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-31-36.

Введение

Робот-манипулятор (РМ) – это разновидность роботов, используемых в промышленности. Они выполняют функции человеческой рабочей силы, по сути, заменяют ее, внешне РМ похож на руку человека. Сочленения сегментов манипулятора допускают вращательные и поступательные движения [1]. РМ для выполнения различных задач оснащают так называемыми рабочими инструментами, способными совершать полезную работу (захваты, сварочные горелки, пульверизаторы для окраски и др.). Некоторые РМ относятся к так

называемым коллаборативным роботам, или ко-роботам (Co-Robots). В соответствии с международным стандартом ISO 8373:2012-03 «Robots and robotic devices» (2012), эти РМ способны безопасно работать совместно с человеком [2, 3]. Вследствие внедрения РМ высвобождается дополнительная рабочая сила, что наиболее актуально в современных условиях.

Целью исследования является выявление тенденций развития отечественного производства роботов-манипуляторов. Объектом исследования являются российские предприятия-производители РМ. В качестве методов исследования исполь-

зовалось обобщение информации о предприятиях и данных о рынке робототехники.

Национальные задачи

Президент России Владимир Путин, говоря о развитии робототехники в России, заявил, что в этой области, «к сожалению», есть над чем работать [4]. При этом главой Минпромторга России Денисом Мантуровым 26 марта 2024 г. озвучена амбициозная задача за шесть лет войти в ряд из первых 25 стран по внедрению роботов [5]. Вот уже 7 июня 2024 г. на Петербургском Международном экономическом форуме состоялось новое заявление Владимира Путина о том, что Россия должна в кратчайшие сроки войти в топ-25 стран по плотности роботизации, должно быть установлено более 100 000 роботов на отечественной технологической базе [6]. Итак, исходя из заявлений высших чиновников, национальная задача может быть выражена в цифрах: за шесть лет установить 100 000 РМ и войти в 25 стран по плотности роботизации.

Оценка целей, заявленных Правительством Российской Федерации

Для оценки степени внедрения РМ принято использовать данные о плотности роботизации. Периодически рейтинг стран с этим показателем публикует IFR (International federation of robotics, Международная федерация робототехники). Официально рейтинг показывается только на 20 стран, т. е. 25-е место нам неизвестно. Тогда будем ориентироваться на ближайшую известную позицию в рейтинге – это Испания с плотностью роботизации в 169 роботов на 10 000 рабочего персонала, по данным за 2022 г. [7]. Известно, что в России 9 774 000 человек [8] задействованы в обрабатывающей промышленности, парк роботов оценивается в 8439 штук на 2022 г. [9].

- *Перечень производителей отечественных РМ*
- *List of domestic robotic arm manufacturers*

Бренд / производитель	Город	Сайт	Тип РМ
«РОБОПРО» (Rozum)	Москва	robopro.pro	Коллаборативные
<i>Eidos Robotics</i>	Казань	eidos-robotics.ru	Промышленные
«Промобот»	Пермь	promo-bot.ru	Коллаборативные
<i>RUSROBOT</i>	Челябинск	rusrobot.ru	Промышленные
«Уникальные роботы»	Москва	uniqerobotics.ru	Промышленные
<i>Aripix Robotics</i>	Москва	aripix.ru	Промышленные

Производим расчет плотности роботизации, которой соответствует внедрение в стране 100 000 штук РМ, учитываем уже установленные 8439 штук и получаем: 108 439 штук – парк роботов. Делим на 977,4 десятка тысяч работников промышленности, тогда значение плотности роботизации будет 111 РМ на 10 000 работников промышленности.

Оценивая полученные данные и понимая, что 20-е место соответствует плотности роботизации в 169 роботов на 10 000 рабочего персонала, можно сделать вывод, что полученное значение предполагаемого 25-го места в 111 роботов выглядит вполне реалистично.

Допущения в расчетах: мы не учитывали выбытия уже установленных РМ, в расчете количества человек, задействованных в обрабатывающей промышленности, учтены не только основные рабочие, но и административный персонал, допускаем, что за шесть лет число работников промышленности не изменится.

Отечественные производители РМ

Перечень отечественных РМ, которые разрабатываются и производятся в России, приведен в таблице. Основные критерии, по которым того или иного производителя мы относили к отечественным, следующие:

- 1) наличие производства РМ на территории России;
- 2) использование отечественных разработок в конструкции РМ.

Список в таблице не включает в себя производителей и разработчиков отечественных робототехнических комплексов и решений на базе РМ. Далее подробно рассматриваются особенности вышеуказанных производителей РМ.

«РОБОПРО» (ROZUM). Компания исторически начала свое развитие в Белоруссии, затем ее выкупила группа инвесторов из России, после чего она смогла начать локализацию производства

колaborативных РМ. Была налажена сборка РМ, но по-прежнему некоторые узлы разрабатываются и собираются в Белоруссии. Особенно стоит отметить наличие у компании собственного производства сервомоторов. В продуктовой линейке предприятия есть РМ с грузоподъемностью от 5 до 16 кг, также компания производит и продает собственные сервомоторы. В ассортименте периодически появляются новые модели РМ. Наличие сильных инвесторов позволяет проекту интенсивно развиваться, иметь высокие производственные мощности для удовлетворения растущего спроса.

Eidos Robotics. Компания расположена в Казани. Разрабатывают и производят шестиосевой РМ, модель А12-1450, с полезной нагрузкой до 12 кг (рис. 1). Такой РМ уже используется в промышленности, известно, что есть плотное сотрудничество с «КАМАЗ». Также в компании имеется собственная разработка контроллера, способного управлять РМ различных производителей, для программирования роботов используется известный язык программирования Python. Есть производственные мощности, позволяющие расширить производство РМ.

«Промобот». Компания известна своими роботами-консультантами и сервисными роботами, которые продаются в России и за рубежом. В мае 2024 г. на выставке «Металлообработка»



• Рис. 1. РМ Eidos на выставке «Металлообработка – 2024» показывает свое применение в составе сварочной ячейки

• Fig. 1. Robotic arm Eidos at the exhibition “Metalloobrabotka – 2024” shows its application in welding

компания представила своего колaborативного РМ (рис. 2). Модель Promobot M13 представляет собой шестиосевой РМ с грузоподъемностью до 13 кг [10]. Продукт имеет эстетичный дизайн, заявлен удобный интерфейс для программирования и управления РМ. На рис. 3 показана модель Promobot M13 в полной комплектации, куда входят сам РМ, блок управления и пульт управления. Решение разрабатывается и производится на территории Российской Федерации, в Перми.



• Рис. 2. Демонстрация РМ Promobot M13 на выставке «Металлообработка – 2024»

• Fig. 2. Demonstration of the Promobot M13 robotic arm at the “Metalloobrabotka – 2024” exhibition



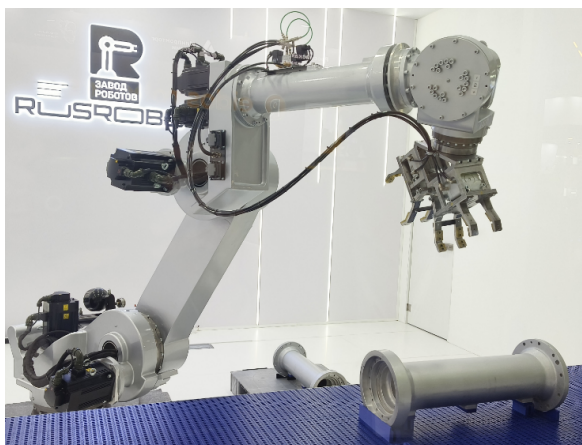
• Рис. 3. РМ Promobot M13 в полной комплектации

• Fig. 3. Robotic arm Promobot M13 in full configuration

Опыт команды в сфере серийного производства робототехнической продукции дает основание полагать, что компания сможет нарастить производство РМ до необходимых целевых объемов, учитывающих рост промышленности.

RUSROBOT. Компания из Челябинска организовала производство промышленных РМ. Огромным преимуществом компании является наличие собственного производства изделий из металла с высокой численностью персонала: такое производство является не только источником комплектующих, но и первым потребителем РМ. Таким образом, компании удается улучшать качество производства РМ, используя ресурсы своего предприятия в качестве опытной площадки. В ассортименте представлена линейка промышленных РМ с грузоподъемностью от 6 до 120 кг. Основная ниша – это тяжелая обрабатывающая промышленность, на которой сфокусирована деятельность предприятия. На рис. 4 показана фотография демонстрационного робота от компании ООО «Русский Робот».

«Уникальные роботы». Компания разработала собственный РМ, основной конструктивной особенностью которого является модульность, позволяющая одному и тому же роботу выполнять совершенно разные задачи после незначительной модернизации. Известно также, что, по желанию заказчика, сотрудники компании могут вносить изменения в конструкцию РМ, стараясь максимально обеспечить решение производственных задач заказчиков. Территориально компания расположена в Москве.



• Рис. 4. Демонстрационный робот от компании ООО «Русский Робот»
• Demonstration robot from the company Russian Robot LLC

Aripix Robotics – участник «Сколково», занимается разработкой и производством РМ, а также внедрением собственных РМ в различные производственные технологические процессы. Компания ведет активную деятельность в качестве интегратора промышленных роботов, используя своего РМ.

Заключение

Можно выделить следующие тенденции развития отечественного производства РМ:

- 1) наличие достаточно большого количества разработчиков РМ, несмотря на недостаточно развитый на сегодняшний момент рынок;
- 2) не все разработчики обладают достаточными производственными мощностями, способными обеспечить серийный выпуск РМ;
- 3) можно выделить компании с сильным промышленным потенциалом, способные обеспечить массовое производство РМ: «РОБОПРО» (*Rozum*), *EidosRobotics*, «Промобот», *RUSROBOT*;
- 4) усиление внимания государства к необходимости массового внедрения РМ на отечественных промышленных предприятиях.

Таким образом, можно говорить о потенциальной готовности отечественной промышленности расширить парк установленных РМ на 100 000 штук роботов и занять 25-е место в рейтинге со значением плотности роботизации в 111 РМ на 10 000 работников промышленности. Хотя для более точной оценки готовности промышленных предприятий требуется детальное изучение каждой компании, что весьма затруднительно, поскольку компании сохраняют свою коммерческую тайну и неохотно делятся внутренней информацией. Имеется достаточно большое количество производителей РМ, за многими из них стоят серьезные инвестиционные капиталы, способные обеспечить дорогостоящие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и объемы производства.

На данный момент роботизация в России идет медленно, чтобы увеличить парк роботов более чем в 10 раз, промышленным предприятиям нужно создать выгодные условия, позволяющие широко внедрять РМ. Промышленность находится в ожидании мер поддержки со стороны Правительства, стимулирующих закупку РМ для массовой интеграции на отечественные предприятия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дунаева Е. С. Специфика применения роботов-манипуляторов в производстве // Актуальные вопросы современной экономики. 2021. № 10. С. 50–55. EDN: DNECFB.
2. Ющенко А. С. Коллаборативная робототехника и человеческий фактор // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики / под ред. А. А. Обознова, А. Л. Журавлева. М.: Ин-т психологии РАН, 2020. С. 83–103. Doi: 10.38098/ergo.2020.007. EDN: ZAQAVN.
3. Дембинская Н. «Уже некого набирать»: Россия столкнулась с новой проблемой. 08.05.2023. URL: <https://ria.ru/20230508/trudoustroystvo-1870029905.html> (дата обращения: 13.09.2024).
4. РИА НОВОСТИ: Путин оценил развитие робототехники в России. 16.02.2024. URL: <https://ria.ru/20240216/putin-1927805585.html> (дата обращения: 27.05.2024).
5. РИА НОВОСТИ: России необходимо войти в топ-25 по уровню роботизации, заявил Мантуров. 26.03.2024. URL: <https://ria.ru/20240326/robotizatsiya-1935822818.html> (дата обращения: 27.05.2024).
6. РОСБИЗНЕСКОНСАЛТИНГ: Путин поставил задачу установить в России 100 тыс. роботов. 07.06.2024. URL: <https://www.rbc.ru/economics/07/06/2024/6663015d9a7947756bd11f79> (дата обращения: 10.06.2024).
7. International federation of robotics. URL: <https://ifr.org/wr-industrial-robots/> (дата обращения: 01.09.2024).
8. Правительство Российской Федерации. Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6IOSEIuQqYnvR4tGMcy6rv6Qm.pdf#:~:text=Обрабатывающие%20производства%20в%20Российской%20Федерации,занято%20около%2010%2C1%20млн.%20человек> (дата обращения: 01.09.2024).
9. Национальная ассоциация участников рынка робототехники (НАУРП). URL: <https://robotunion.ru> (дата обращения: 02.09.2024).
10. Компания «Промобот». URL: <https://promo-bot.ru/production/promobot-m13/> (дата обращения: 14.09.2024).

REFERENCES

1. Dunaeva E. S. The specifics of the use of robotic manipulators in production. Aktualnye voprosy sovremennoj ekonomiki. 2021;(10):50–55 p. (In Russ.). EDN: DNECFB.
2. Yushchenko A. S. Collaborative robotics and the human factor. Aktualnye problemy psixologii truda, inzhenernoj psixologii i ergonomiki; eds by A. A. Oboznov, A. L. Zhuravlev. Moscow: Institut psixologii RAN; 2020, pp. 83–103. (In Russ.). EDN: ZAQAVN. Doi: 10.38098/ergo.2020.007.
3. Dembinskaya N. There is no one left to recruit: Russia is faced with a new problem. 08 May 2023. Available from: <https://ria.ru/20230508/trudoustroystvo-1870029905.htm> [Accessed 13 September 2024].
4. RIA NOVOSTI. Putin praised the development of robotics in Russia. 16 February 2024. Available from: <https://ria.ru/20240216/putin-1927805585.html> [Accessed 27 May 2024].
5. RIA NOVOSTI: Russia needs to enter the top 25 in terms of robotics, Manturov said. 26 March 2024. Available from: <https://ria.ru/20240326/robotizatsiya-1935822818.html>. [Accessed 27 May 2024].
6. ROSBUSINESSCONSULTING: Putin has set the task of installing 100,000 robots in Russia. 07 June 2024. Available from: <https://www.rbc.ru/economics/07/06/2024/6663015d9a7947756bd11f79> [Accessed 10 June 2024].
7. International federation of robotics. Available from: <https://ifr.org/wr-industrial-robots/> [Accessed 01 September 2024].
8. The Government of the Russian Federation. Consolidated strategy for the development of the manufacturing industry of the Russian Federation until 2024 and for the period up to 2035. Available from: <http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6IOSEIuQqYnvR4tGMcy6rv6Qm.pdf#:~:text=Обрабатывающие%20производства%20в%20Российской%20Федерации,занято%20около%2010%2C1%20млн.%20человек> [Accessed 01 September 2024].
9. Russian Association of Robotics (RAR). Available from: <https://robotunion.ru>. [Accessed 02 September 2024].
10. Promobot Company. Available from: <https://promo-bot.ru/production/promobot-m13/> [Accessed 14 September 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергеев Павел Андреевич, аспирант, заведующий лабораторией промышленной электроники Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Sergeev Pavel A., PhD Student, Head at the Laboratory of Engineering School, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electronics, microelectronics, robotics, technological entrepreneurship, artificial intel-

Область научных интересов – электроника, микроэлектроника, робототехника, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект, организация производства, Интернет вещей, искусственный интеллект, электронное машиностроение.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.

Поступила в редакцию 22.09.2024

Поступила после рецензирования 25.09.2024

Принята к публикации 10.10.2024

ligence, production organization, Internet of Things, artificial intelligence, electronic engineering.

Solyonyj Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of power systems, information security, technological entrepreneurship, artificial intelligence.

Received 22.09.2024

Revised 25.09.2024

Accepted 10.10.2024

Векторы импортозамещения как факторы технологической зрелости

Кирилл Валерьевич Епифанцев¹

✉ epifancew@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5705-0282, SPIN-код: 4218-3981

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Технологическая зрелость обусловлена умением адаптироваться к текущим современным сложным экономическим условиям на фоне технологического вакуума. Процесс импортозамещения крайне болезненно ощущается в сфере высокоточного оборудования за счет достаточно ресурсоемкого и большого финансового венчурного вливания средств с пролонгированным эффектом, который может дать результат только спустя несколько месяцев экспериментов, налаживания работы датчиков, радиоэлектронных преобразователей. Законодательно процесс импортозамещения в области метрологии сейчас только усложняется из-за увеличения объема стандартов и постановлений Правительства Российской Федерации. Рассматриваются перспективы расширения формата импортозамещения.

Ключевые слова: импортозамещение, метрология, стандартизация

Для цитирования: Епифанцев К. В. Векторы импортозамещения как факторы технологической зрелости // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 37–44. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-37-44.

Original article

Import substitution vectors as factors of technological maturity

Kirill V. Epifantsev¹

✉ epifancew@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5705-0282, SPIN-code: 4218-3981

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Technological maturity is due to the ability to adapt to the current modern difficult economic conditions in a technological vacuum. The process of import substitution is extremely painful in the field of high-precision equipment due to a rather resource-intensive and large financial venture infusion of funds with a prolonged effect, which can give a result only after several months of experiments, setting up sensors, radio-electronic converters. Legislatively, the process of import substitution in the field of metrology is only now increasing the volume of standards and Government Regulations. The theses consider the prospects for expanding the import substitution format.

Keywords: import substitution, metrology, standardization

For citation: Epifantsev K. V. Import substitution vectors as factors of technological maturity. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):37–44. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-37-44.

8 апреля 2022 г. Приказом Министерства промышленности и торговли Российской Федерации утвержден «План мероприятий по импортозамещению измерительного оборудования» [1]. Данный приказ и требования времени подталкивают приборостроителей к созданию улучшенной отечественной измерительной техники. Также к аналогичным документам можно отнести несколько документов по развитию отечественной промышленности – ряд стратегий экономической безопасности, национальной безопасности, пространственного развития (табл. 1). Данные документы подтверждают важность контроля качества изделий авиационной и космической отраслей.

Для импортозамещения важным аспектом также явилось и издание новых переводных

стандартов, осветивших не совсем понятные элементы обозначений зарубежной конструкторской документации. Процесс измерения дефектов формы, согласно ГОСТ 53442-2015, ISO 1101-2017, ГОСТ Р 25346-2015, необходим для контроля круглости, осевого биения, концентричности, параллельности, требований максимума материала, зависимых допусков, теоретически точных размеров. Данную область знаний важно донести до студентов инженерных специальностей, которым еще предстоит неоднократно работать с зарубежной документацией, изучая ноу-хау ранее не известных в системе ЕСКД графических обозначений, в которых замаскированы основные технические требования к технологии, марке стали, сборке конструкции от европейских и американских

инженеров. К тому же многие зарубежные производители отказываются поставлять в Россию часть высокоточных приборов из-за санкций [2]. В условиях импортозамещения данные приборы нуждаются в замене наиболее изнашиваемых компонентов, таких как контактные щупы, подшипники, кронштейны и т. д. Именно поэтому важно развивать процесс наращивания компетенций в области импортозамещения, применяя реверсивный инжиниринг как основу для достижения цели. На рис. 1 показан прогнозный анализ измерений до 2025 г., что подтверждает актуальность увеличения финансирования приборной базы [3].

В 2023 г. Институт нефтегазовых технологических инициатив выпустил стандарт предприятия «СТО ИНТИ М.230.1-2023. Услуги в области обратного проектирования (реверс-инжиниринга). Требования и порядок оказания» [4]. Можно сказать, что это первый официальный стандарт в области обратного проектирования. В стандарте описаны, в частности, применение координатно-измерительной машины (КИМ) для проведения обмеров особенно ответственных частей изделия для будущего прототипа, использование твердомеров и спектроанализаторов для получения исходных данных о марке материалов детали. Достаточно подробно в СТО [4] изложен порядок присвоения литер от экспериментальных, изделия-аналога, до литеры O_1 . Несколько

страниц стандарта посвящены методу работы с риск-менеджментом. Однако в стандарте лишь косвенно упоминается вопрос защиты интеллектуальной собственности и трансфер технологий, с чего, собственно, не лишним было бы начать импортозамещающий процесс (ГОСТ Р 58048-2017. Трансфер технологий).

В табл. 1 приведены некоторые нормативные акты, касающиеся импортозамещения.

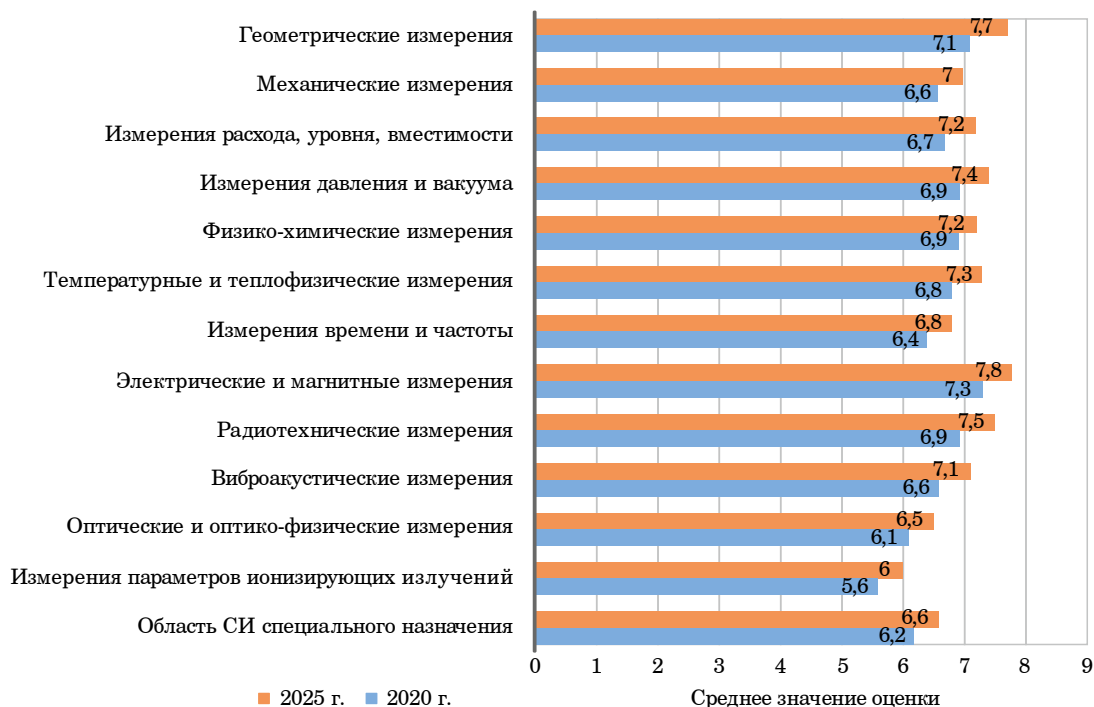
В ряде публикаций за несколько лет процесса импортозамещения сформировались устойчивые методы оценки импортозависимости [5]:

1) «Объем импорта». Авторы метода оценки – М. Л. Зубкова, В. К. Сенчагов, С. Н. Митяков;

2) «Прирост объема импорта, в процентах». Авторы – С. А. Коноваленко, Н. Г. Гаджиев, Е. В. Карпунина, А. Ю. Карпунин;

3) «Индекс физического объема импорта». Расчет данного индекса описан в «Стратегии экономической безопасности Российской Федерации до 2030 г.».

Как уже подчеркивалось выше, национальные стандарты (ГОСТ Р 53442-2015 и ГОСТ 25346-2013) в настоящий момент отражают всю суть проблемы – не все конструкторские обозначения до конца переведены, грамотно объясняются и применяются на производстве. Большинство из труднопонимаемых символов касаются координатной метрологии (ISO 1101 «Geometrical products specification»). Знание основ координат-



• Рис. 1. Прогнозный анализ измерений до 2025 г.
 • Fig. 1. Predictive analysis of measurements until 2025

- Таблица 1. Основные законодательные акты в области импортозамещения
- Table 1. Main legislative acts in the field of import substitution

Нормативный акт	Предусмотренные меры поддержки
Указ Президента Российской Федерации от 30 марта 2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»	Документ отражает меры по импортозамещению в ИТ, а также все актуальные ограничения в этой сфере, связанные с иностранным программным обеспечением. С 1 января 2025 г. органам госвласти, заказчикам запрещается использовать иностранное программное обеспечение на объектах критической информационной инфраструктуры
Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в РФ»	Регулирует отношения, возникающие между субъектами, осуществляющими деятельность в сфере промышленности, организациями, входящими в состав инфраструктуры поддержки указанной деятельности, органами госвласти Российской Федерации
Постановление Правительства Российской Федерации от 12 декабря 2019 г. № 1649 «Об утверждении правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским организациям на финансовое обеспечение затрат на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по современным технологиям в рамках реализации такими организациями инновационных проектов и о признании утратившими силу некоторых актов правительства РФ»	Введены базовые инструменты поддержки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Они предусматривают выделение субсидий для компенсации части затрат организаций на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по современным технологиям. Максимальный срок предоставления субсидии – три календарных года. Это могут быть расходы на: <ul style="list-style-type: none"> – оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением научно-исследовательских работ; – подготовку и закупку исследовательского, испытательного, контрольно-измерительного и вспомогательного оборудования и комплектующих к нему
Постановление Правительства Российской Федерации от 18 июня 2021 г. № 931 «О государственной поддержке российских организаций на компенсацию части затрат в целях создания новой конкурентоспособной промышленной продукции, связанных с проведением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и (или) омологацией существующей промышленной продукции для внешних рынков, и признании утратившими силу постановления правительства РФ от 8 июля 2020 г. № 1007 и отдельного положения акта правительства РФ»	Определяет механизм господдержки в виде компенсации части затрат в целях создания новой конкурентоспособной промышленной продукции, связанной с проведением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и (или) омологацией (усовершенствованием) существующей промышленной продукции для внешних рынков
Постановление Правительства Российской Федерации от 25 мая 2017 г. № 634 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета российским организациям на компенсацию части затрат на производство и реализацию пилотных партий средств производства потребителям»	Документ направлен на поддержку (субсидирование) производства и реализации пилотных партий средств производства. Субсидии предоставляются в размере не более 50 % от общего размера фактически понесенных затрат, включая затраты на: <ul style="list-style-type: none"> – оплату сырья, материалов и комплектующих, необходимых для производства пилотной партии; – оплату изготовления и (или) приобретения оснастки, используемой для производства пилотной партии (не более 20 % размера предоставляемой субсидии)
Постановление Правительства Российской Федерации от 6 сентября 2022 г. № 1570 «Об утверждении правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским кредитным организациям на возмещение недополученных ими доходов по кредитам»	Определяет механизм промышленной ипотеки (льготного кредита для покупки производственных площадей для быстрого запуска или расширения бизнеса). Заемщики кредитуются под следующие объекты недвижимости: здания, строения, сооружения либо части сооружений, приобретаемые для промышленного производства

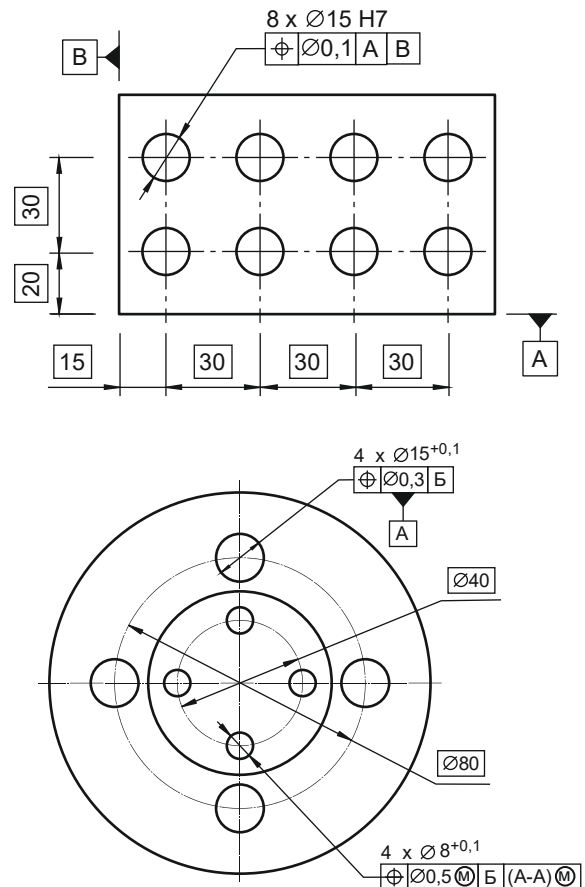
- Окончание табл. 1
- End of the table 1

Нормативный акт	Предусмотренные меры поддержки
Указ Президента Российской Федерации от 2 марта 2022 г. № 83 «О мерах по обеспечению ускоренного развития отрасли информационных технологий в РФ»	Стратегия импортозамещения ИТ базируется на дополнительной государственной поддержке: – освобождение от плановых проверок госорганами; – освобождение от налога на прибыль до 31 декабря 2024 г.; – кредиты под 3 % годовых на развитие новых проектов; – возможность воспользоваться льготной ипотекой
Постановление Минпромторга России № 878 от 10 июля 2017 г.	С 1 сентября 2019 г. действуют новые правила национального режима при закупке радиоэлектронной продукции по Закону № 44-ФЗ, дополняющие существующее Постановление Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2016 г. № 925
Постановление Правительства Российской Федерации от 3 мая 2019 г. № 550 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета на поддержку проектов по преобразованию приоритетных отраслей экономики и социальной сферы на основе внедрения отечественных продуктов, сервисов и платформенных решений, созданных на базе „сквозных“ цифровых технологий»	1. Российские организации, за исключением государственных (муниципальных) учреждений, могут претендовать на получение государственной поддержки в виде гранта. 2. Предоставляется на реализацию проектов по внедрению отечественных продуктов, сервисов и платформенных решений, созданных на базе «сквозных» цифровых технологий, в рамках реализации дорожных карт по направлениям развития «сквозных» цифровых технологий

ной метрологии позволит решить многие проблемы реверсивного инжиниринга.

В качестве примера из ГОСТ Р 53442-2015 – «TED-размер» (рис. 2). Он является одним из сложнопонимаемых и применяемых исключительно на ограниченном количестве предприятий элементов [6–9]. Это связано с его недостаточно подробной интерпретацией в ГОСТ 53442 [10, 11]. Во многом применение вышеуказанных обозначений на чертежах дает возможность предусмотреть контроль шероховатости, дефектов формы, позволяет с большей вероятностью осуществить чтение иностранных чертежей, поскольку графические обозначения были переведены с европейских стандартов.

При этом важно понимать, что данные приборы не должны иметь высокую стоимость и сложные предварительные процессы калибровки и юстировки для оперативного проведения измерения. Актуальным в настоящее время является вопрос применения метрологического обеспечения реверсивного инжиниринга, т. е. машин, используемых для сканирования прототипов (3D-сканеры, КИМ, кругломеры). В исследовании [12] рассматривается вопрос реверсивного инжиниринга как процесс, затрагивающий глобально различные сферы экономики, но, прежде всего, инновационную, следствием этого стало появление «инновационного импортозамещения» [5], также В. К. Фальцман [15] определил импортозамещение прямое (когда вводятся тарифы на ввоз

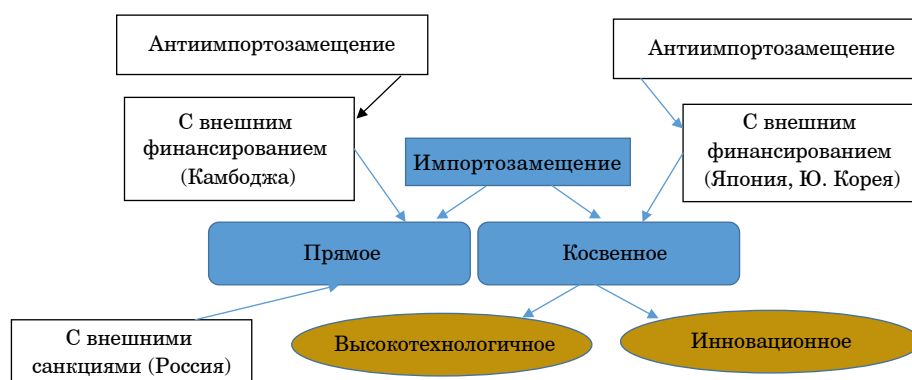


• Рис. 2. Обозначение TED на чертеже
• Fig. 2. TED designation in the drawing

товаров из-за рубежа) и косвенное (когда создаются товары лучшего качества в стране и покупатели самостоятельно отказываются от зарубежных товаров). В свою очередь, косвенное импортозамещение способно заместить товары по высокотехнологическому методу (совершенствуя действующие товары) и инновационному (создавая новые товары, не известные ранее). Кроме того, в [1] и [13] рассматривается вопрос важности реверсивного инжиниринга для получения новых металлов и сплавов в машиностроении, а также такой важный элемент, как проектирование протеза. Итак, важным способом создания предпосылок для качественного импортозамещения являются два составных элемента, показанные на рис. 3.

В табл. 2 приведены товары, созданные в Российской Федерации в рамках обратного инжиниринга в 2022 г.

Таким образом, импортозамещение представляет собой логический процесс взросления промышленности государства, когда реализуется весь потенциал, сдерживаемый до этапа импортозамещения многими иностранными компаниями, предлагающими готовое решение, в результате которого необходимости для создания нового, инновационного продукта нет. Импортозамещение при этом не означает полный отказ от зарубежного производства – частично промежуточные элементы могут закупаться с целью создания нового, более совершенного механизма или машины. Однако цепь поставок и время поставок при этом будут значительно увеличены. С данной точки зрения сосредоточить в России и станки, и сырье, и комплектующие было бы отличным решением. Импортозамещение также включает в себя поиск альтернативных поставщиков зарубежного обо-



• Рис. 3. Виды импортозамещения [14]
 • Fig. 3. Types of import substitution [14]

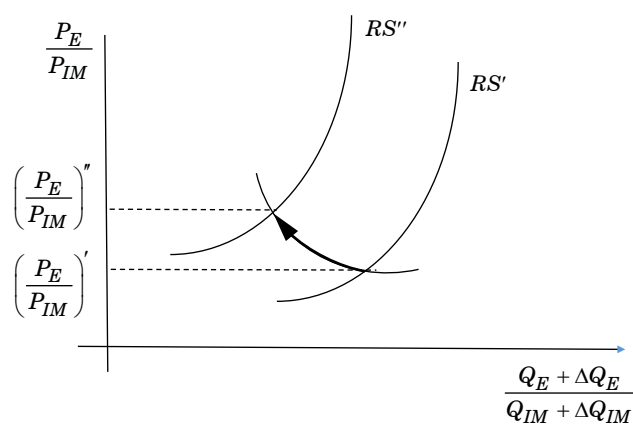
• Таблица 2. Примеры производства в Российской Федерации в рамках обратного инжиниринга в 2022 г. [15]
 • Table 2. Examples of production in the Russian Federation as part of reverse engineering in 2022 [15]

Продукция, произведенная по проектам импортозамещения	Назначение продукции	Производитель
Разработка литийионных аккумуляторов, обеспечивающих автономную работу устройств при температурах от -50 до +50 °С	Для медицины и авиации	Холдинг «Росэлектроника» госкорпорации «Ростех»
Разработка вертолетного двигателя ВК-650	В вертолетах Ансат VRT-500 и Ка-226Т	«ОДК-Климов»
Производство полимерных композиционных материалов на основе полипропилена (ПП) и полиамида (ПА)	Для замещения импорта конструкционных пластмасс	Саратовский завод полимерных материалов
Создание системы автоматического управления (САУ) для нового авиационного двигателя ПД-8	Для оснащения пассажирских лайнеров SSJ- NEW	Госкорпорация «Ростех»
Изготовление компонентов авиационного двигателя	Для авиационного двигателя ПД-14	Пермский завод «Машиностроитель»
Производство прокатных валков	Для станов 5000 массой более 60 т	Кушвинский завод прокатных валков

рудования, которые способны предложить свое, менее разрекламированное, но не уступающее по качеству оборудование. Значительный вклад в развитие процесса импортозамещения вносят ученые-исследователи, финансирование работы которых ведется из фондов грантовых программ. В свою очередь, указывается, что серьезный урон импортозамещению России был нанесен компанией *Taiwan Semiconductor Manufacturing Company* [16], так как это был важный поставщик радиоэлектронной продукции. С другой стороны, мы можем рассмотреть успех компании *Mahindra* в Индии, которая самостоятельно преодолела барьер и вышла на передовые позиции по продажам недорогих автомобилей, за счет спроса перекрывая издержки на закупку комплектующих в электронике. Последствия роста при импортозамещении показаны на рис. 4.

Если количество импортозамещенных товаров, которые в основном импортируются, Q_{IM} , повышается в стране, предложение этих товаров увеличивается, что приводит к падению цен на них. Следовательно, цена экспортируемых товаров становится выше, в результате чего кривая предложения экспортируемых товаров смещается влево от RS' до RS'' [5].

Итак, процесс импортозамещения происходит как элемент раскрытия собственного потенциала страны в сфере изобретательства и становится логичным подходом к технической революции. Безусловно, мы также можем выделить процессы антиимпортозамещения, включающего в себя накачивание потенциала страны товарами и промышленностью непосредственно покровительствующего «старшего товарища». Такие процессы также приводят к промышленной революции и повышению конкурентоспособности. Например, к таким странам можно



• Рис. 4. Последствия импортозамещающего роста [5]
 • Fig. 4. Consequences of import substitution growth [5]

отнести Южную Корею и Японию, которые получили поддержку от США в период достаточно убыточных в экономике событий. Корея и Япония – косвенное импортозамещение, которое вызывает прирост отчасти товаров собственного производства. У таких стран, как Камбоджа, Таиланд, Вьетнам, в экономике наблюдается пример финансовой помощи в строительстве со стороны китайских инвесторов, и это прямое импортозамещение, которое не предполагает развития камбоджийских товаров, но и не накладывает санкции (как, например, в России) (рис. 3). Большую роль в косвенном типе импортозамещения, конечно, сыграли финансирование поддержки собственных японских и корейских разработок и наглядный пример для производителей, как надо делать, что делать и, главное, кому все это продавать, пусть даже и по заниженной стоимости. Однако данные денежные вливания, как правило, приводят к полной политической и экономической зависимости и уязвимости от страны – спонсора антиимпортозамещения, и, по желанию той же страны, государство или отдельно взятое предприятие может прийти в упадок, если произойдут политические или экономические недопонимания и разногласия, поэтому зависимость в данном случае неизбежна, и наградой за нее становится колониальная зависимость. Другой пример импортозамещения – Иран, Куба, Вьетнам, Пакистан, Индия, которые все-таки стараются увеличивать прирост собственных разработок за счет привлечения идей внутри государства, развития программы финансирования ученых, которые вместе с производителями и привносят «свежие» изобретения. Однако мы, конечно, не видим большой рекламы иранских продуктов в сетях YouTube и на билбордах европейских городов, но россиянам хорошо известны иранские автомобили *Iran khodro*, иранские сухофрукты, кондитерские изделия и др.

Безусловно, импортозамещение – сложный процесс, проходящий под давлением или покровительством стран приграничного статуса, которые могут иметь, в свою очередь, разные планы по помощи или давлению на своего соседа. В любом случае импортозамещение регулируется с помощью санкций извне и с помощью пошлин внутри страны, и при определенных рычагах давления ситуацию можно нормализовать, найдя выход на обходные пути международной интеграции. Примером этому во времена «железного занавеса» стали стандарты СЭВ (Совета экономической взаимопомощи), сейчас – это БРИКС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Приказ Минпромторга России от 02.08.2021 № 2918 (ред. от 07.07.2023). М., 2021.
2. Волошкин А. А., Салихов Д. Д., Ласунова С. В. Разбор способов реверсивного инжиниринга // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвящ. 300-летию РАНЖ сб. докл. Нац. конф. с междунар. участием. Белгород, 2022. С. 17–22.
3. Министерство промышленности и торговли РФ. Прогноз потребностей экономики и общества в измерениях на 2020–2025 годы. М., 2020. 194 с.
4. Стандарт организации «Услуги в области обратного проектирования (реверс-инжиниринга). Требования и порядок оказания». СПб.: Изд-во ИНТИ, 2023. 74 с.
5. Оруч Т. А. Методологические подходы к анализу экономической сущности импортозамещения как фактора сокращения технологической и инновационной отсталости: региональный аспект // Вестн. евразийской науки. 2023. Т. 15. № 2. С. 1–13.
6. Авторское свидетельство SU 456760 A1. Плаз для разбивки теоретического чертежа судна / Гильбурт Б. М., Мильто А. А., Нахмурина Г. Д. 15.01.1975. Заявка № 1778530 от 28.04.1972.
7. Давыдова С. В., Андриянов И. В. Принципы систематизации судовой поверхности буксирных судов при разработке теоретического чертежа интерполяционным методом // Науч. проблемы вод. транспорта. 2020. № 63. С. 55–61.
8. Готман А. Ш. Расчет остаточного сопротивления судна по теоретическому чертежу // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1 (50). С. 24–40.
9. Епифанцев К. В. Анализ применения теоретически точного размера (TED) при производстве высокоточных изделий // Инновационные механизмы и стратегические приоритеты научно-технического развития: сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практической конф. Стерлитамак, 2021. С. 101–103.
10. ГОСТ Р 53442-2015 (ИСО 1101:2012). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биевния. М.: Стандартиформ, 2015.
11. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. М.: Стандартиформ, 2013.
12. Социально-экономическое развитие регионов. Глава 8.5: Стандартизация в эпоху реверсивного инжиниринга: концепция уменьшения экономических затрат в приборостроении / В. В. Окрепилов, Ю. А. Антохина, Е. А. Фролова, К. В. Епифанцев / под ред. акад. РАН В. В. Окрепилова; Ин-т проблем региональной экономики РАН. М.: Наука, 2024. С. 456–470.
13. Скрипничук Е. В., Решетникова Е. С. Реверсивный инжиниринг // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2021. № 20. С. 238–245.
14. Фальцман В. К. Приоритеты структурной политики: импортозависимость, импортозамещение, возможности экспорта инновационной продукции промышленности // ЭКО. 2014. № 5 (479). С. 162–177.
15. Алоян Г. Н. Инновационные аспекты региональной экономической политики и их развитие в условиях импортозамещения // Инновационное развитие экономики. 2023. № 2 (74). С. 17–22.
16. Володин А. Е., Молчанова Е. С., Рожков Р. С. Импортозамещение в Российской Федерации в условиях санкций: тенденции, риски, региональный аспект // Экономика и управление: проблемы, решения. 2023. Т. 3, № 9 (139). С. 188–194.

REFERENCES

1. Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated 08/02/2021 No. 2918 (ed. dated 07/07/2023). Moscow; 2021. (In Russ.).
2. Voloshkin A. A., Salikhov D. D., Lasunova S. V. Analysis of methods of reverse engineering. International scientific and technical conf. of young scientists of V. G. Shukhov BSTU, dedicated to the 300th anniversary of the RANK of the sat. dokl. National conf. with the international participation. Belgorod; 2022, pp. 17–22. (In Russ.).
3. Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. Forecast of the needs of the economy and society in measurements for 2020–2025. Moscow; 2020. 194 p. (In Russ.).
4. The standard of the organization “Services in the field of reverse engineering (reverse engineering). Requirements and procedure for rendering services”. SPb.: Publishing house of INTI; 2023. 74 p. (In Russ.).

5. Oruch T. A. Methodological approaches to the analysis of the economic essence of import substitution as a factor in reducing technological and innovative backwardness: a regional aspect. *Vestn. Eurasian science*. 2023;15(2):1–13. (In Russ.).
6. Copyright certificate SU 456760 A1. Plaza for the breakdown of the theoretical drawing of the vessel; Gilbert B. M., Milto A. A., Nakhmurina G. D. 15.01.1975. Application No. 1778530 dated 04/28/1972. (In Russ.).
7. Davydova S. V., Andriyanov I. V. Principles of systematization of the ship surface of tugboats in the development of a theoretical drawing by the interpolation method. *Scientific problems of waters transport*. 2020;(63):55–61. (In Russ.).
8. Gotman A. S. Calculation of the residual resistance of the vessel according to the theoretical drawing. *Marine intelligent technologies*. 2020;(4-1(50)):24–40. (In Russ.).
9. Epifantsev K. V. Analysis of the application of theoretically accurate size (TED) in the production of high-precision products. *Innovative mechanisms and strategic priorities of scientific and technical development: collection of articles based on the results of the International scientific and practical conference. Sterlitamak*; 2021, pp. 101–103. (In Russ.).
10. GOST R 53442-2015 (ISO 1101:2012). The basic rules of interchangeability. The product characteristics are geometric. Setting geometric tolerances. Tolerances of shape, orientation, location and runout. Moscow: Standartinform; 2015. (In Russ.).
11. GOST 25346-2013 (ISO 286-1:2010). The basic rules of interchangeability. The product characteristics are geometric. The tolerance system for linear dimensions. Basic provisions, tolerances, deviations and landings. Moscow: Standartinform; 2013. (In Russ.).
12. Okrepilov V. V., Antokhina Yu. A., Frolova E. A., Epifantsev K. V. Socio-economic development of the regions. Chapter 8.5: Standardization in the era of reverse engineering: the concept of reducing economic costs in instrument engineering; eds by acad. RAS V. V. Okrepilova; Institute of Problems of Regional Economics of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka; 2024, pp. 456–470. (In Russ.).
13. Skripnichuk E. V., Reshetnikova E. S. Reverse engineering. *Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials works*. 2021;(20):238–245. (In Russ.).
14. Faltsman V. K. Priorities of structural policy: import dependence, import substitution, export opportunities for innovative industrial products. *ECO*. 2014;(5(479)):162–177.
15. Aloyan G. N. Innovative aspects of regional economic policy and their development in the context of import substitution. *Innovative development of the economy*. 2023;(2(74)):17–22. (In Russ.).
16. Volodin A. E., Molchanova E. S., Rozhkov R. S. Import substitution in the Russian Federation under sanctions: trends, risks, regional aspect. *Economics and management: problems, solutions*. 2023;3(9(139)):188–194. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Епифанцев Кирилл Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – стандартизация процессов координатной метрологии, импортозамещение высокоточных приборов, приборы для измерения дефектов формы и контура.

Поступила в редакцию 02.10.2024

Поступила после рецензирования 07.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Epifancev Kirill V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – standardization of coordinate metrology processes, import substitution of high-precision instruments, devices for measuring shape and contour defects.

Received 02.10.2024

Revised 07.10.2024

Accepted 10.10.2024

Инновационное решение в исследовании поверхности сложной геометрической формы сканирующим интерференционным щупом

Евгений Евгеньевич Майоров¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-код: 8599-8975

Ирина Анатольевна Жулега¹

zhulega@mail.ru, orcid.org/0000-0002-2058-9540

Андрей Владимирович Новиков²

a-novikov08@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6555-187X, SPIN-код: 4093-1686

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Ивангород, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен вопрос измерения микрорельефа поверхности инструментов стоматологического назначения сканирующим интерференционным щупом. От микрорельефа поверхности полира зависит качество уровня эстетики реставраций на твердых тканях зуба, а интерференционный щуп позволяет получить точную и достоверную информацию о геометрических параметрах негладких поверхностей, поэтому работа перспективна и актуальна. Описаны образцы для исследований, которые предназначены для удаления излишков композитного материала и обработки контура реставрационной поверхности. Получены данные о микрорельефе поверхности полиров, а именно – результаты измерений расстояния до поверхности полиров, а также информация о распределении коэффициента отражения от исследуемых поверхностей в поперечном направлении.

Ключевые слова: коэффициент отражения, полир, интерференционный щуп, апертурный угол, контролируемая поверхность, автоклавирование, длина когерентности

Для цитирования: Майоров Е. Е., Жулега И. А., Новиков А. В. Инновационное решение в исследовании поверхности сложной геометрической формы сканирующим интерференционным щупом // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 45–50. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-45-50.

Original article

An innovative solution in the study of a complex geometric surface with a scanning interference probe

Evgeny E. Maiorov¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-code: 8599-8975

Irina A. Zhulega¹

zhulega@mail.ru, orcid.org/0000-0002-2058-9540

Andrey V. Novikov²

a-novikov08@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6555-187X, SPIN-code: 4093-1686

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

² Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation", Ivangorod, Russian Federation

Abstract. The paper considers the issue of measuring the microrelief of the surface of dental instruments with a scanning interference probe. The quality of the aesthetics of restorations on hard tooth tissues depends on the microrelief of the surface of the polish, and the interference probe allows you to obtain highly informative, accurate and reliable information about the geometric parameters of non-smooth surfaces, therefore the work is promising and relevant. The paper describes research samples that are designed to remove excess composite material and process the contour of the restoration surface. Data on the microrelief of the surface of the polishes were obtained, namely: the results of measurements of the distance to the surface of the polishes, as well as information on the distribution of the reflection coefficient from the studied surfaces in the transverse direction.

Keywords: reflection coefficient, polish, interference probe, aperture angle, controlled surface, autoclaving, coherence length

For citation: Maiorov E. E., Zhulega I. A., Novikov A. V. An innovative solution in the study of a complex geometric surface with a scanning interference probe. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(5):45–50. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-45-50.

Введение

Контроль геометрических параметров поверхности микрорельефа и макрорельефа исследуемого объекта всегда была значимой задачей для метрологического обеспечения [1, 2]. На сегодняшний день существует множество методов и технических средств исследования поверхности, которые делятся на контактные и бесконтактные [3, 4]. В решении указанной задачи перспективно и актуально использовать бесконтактные методы (оптические или оптико-электронные), так как их чувствительность и диапазон измерений превосходят контактные (механические) методы и средства [5]. За последние десять лет оптические и оптико-электронные приборы контроля поверхности сложной формы поверхности объектов вышли на более высокий уровень измерений за счет высокой точности, широкого диапазона измерений и совместного применения с компьютерными технологиями [6].

Среди всего многообразия оптических и оптико-электронных методов и средств хотелось бы выделить интерференционные методы контроля поверхности, в частности, интерференционные щупы, работающие в сканирующем и триггерном режимах измерений [7]. Работа этих приборов основана на анализе светового излучения, отраженного от негладкой поверхности исследуемого образца. Эти приборы позволяют получить точную и достоверную информацию о геометрических параметрах (высота вариации микрорельефа и т. д.) негладких поверхностей [8]. Эти щупы имеют преимущества над аналогичными приборами геометрической оптики, а именно: расстояние до контролируемой поверхности не зависит от апертурных углов наблюдения и освещения, высокая чувствительность и точность, широкий диапазон измеряемых величин; соответствуют требованиям производственного контроля, имеют малые размеры и просты в эксплуатации [9]. Разработчики таких приборов особое внимание уделяют источникам излучения (когерентно ограниченным в пространстве и во времени), потому что точность измерений зависит от длины когерентности источника. Исследователи и конструкторы прикладывают огромные усилия для расширения функциональных возможностей, повышения информативного содержания измерений, широкого внедрения в производственную практику этих приборов [10].

В последние десять лет интерференционные щупы нашли свое применение в медицине, в частности, терапевтической стоматологии, для

исследования сложных форм поверхностей биологических объектов, а также для контроля поверхностей стоматологических инструментов (полиров). Одной из значимых задач в терапевтической стоматологии является достижение высокого уровня эстетики реставраций на твердых тканях зуба [11–13]. Именно в этом направлении особое внимание уделяется не только композитным материалам, но и микрорельефу поверхности шлифовальных и полировальных стоматологических инструментов, которые предназначены для удаления излишков пломбированного материала и финишной полировки поверхности реставраций [14, 15]. Качество эстетики реставраций на твердых тканях зуба с применением стоматологического полира зависит от микрорельефа (шероховатости) поверхности. Если шероховатость поверхности полира при его многократном использовании увеличивается, то падает качество реставрации.

В стоматологических клиниках принято после одноразового использования утилизировать полиры, особенно это касается полиров, которые удаляют излишки композитного материала и формируют окончательный рельеф поверхности. Поэтому представляет интерес сравнительный анализ поверхностей новых и неоднократно использованных полиров сканирующим интерференционным щупом.

Получение результатов измерений расстояния до поверхности исследуемых образцов и зависимостей коэффициента отражения в поперечном направлении оси OX сканирующим интерференционным щупом и определило **цель** настоящей работы.

С помощью сканирующего интерференционного щупа были получены данные о расстоянии до поверхности рабочих поверхностей полиров и зависимости коэффициента отражения при линейном перемещении поверхности полира по оси OX с шагом 50 мкм относительно светового луча. Контроль поверхности осуществлялся при нормальном падении светового пучка на поверхность. Проведен сравнительный анализ исследуемых поверхностей.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использовали поверхности полиров, как после многократного автоклавирования, так и новые образцы россий-

ского производства компании «Кагаяки». Полиры имели форму чашки, которые предназначены для удаления излишков материала и обработки контура поверхности. Полиры состояли из полимеризованного силикона, оксид алюминия. Цвет полиров – белый, высота рабочей части – 10,7 мм.

Для анализа поверхности исследуемых объектов использовали сканирующий интерференционный щуп, где в качестве источника излучения применяли светодиод белого света, внешний вид которого показан на рис. 1.

Сканирующий интерференционный щуп построен на основе интерферометра Майкельсона. В качестве источника излучения использовали светодиод белого света с длиной когерентности $l_c = 1...3$ мкм. Объектив имел фокусное расстояние $f = 15,5$ мм, апертуру $A = 0,3$, посредством которого световое излучение источника направлялось на поверхность объекта и в канал опорной ветви. В объектную ветвь вместо зеркала помещена исследуемая поверхность объекта. Оптическая длина другого плеча сканируется с постоянной линейной скоростью v . Сигнал интерференции на доплеровской частоте $f=2v/\lambda$ пропорционален коэффициенту отражения нерассеянной компоненты от исследуемой поверхности полира, положение которой определяется равенством оптических путей, пройденных интерферирующими лучами света. Разрешение в продольном направлении определяли длиной когерентности источника, а разрешение в поперечном направлении – сфокусированным диаметром пятна на поверхности рабочей части полира. Так как поперечное разрешение определяется диаметром фокального пятна d , то последний составлял $d = 10$ мкм и выбирался исходя из условия, что



• Рис. 1. Внешний вид сканирующего интерференционного щупа
• Fig. 1. The appearance of the scanning interference probe

релеевская длина перетяжки должна быть не меньше продольного размера зондируемой пятна.

Принимаемый сигнал интерференции проходил стадии аналоговой и цифровой обработки с последующей визуализацией в реальном времени. Для идентификации точки анализа на поверхности объекта использовали дополнительную подсветку в видимом диапазоне.

Контроль проводили при следующих технических параметрах зонда:

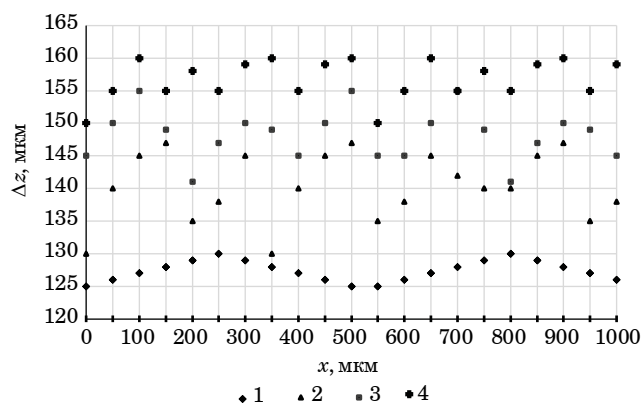
- 1) погрешность измерений – не хуже 3 мкм;
- 2) диапазон измерений рельефа поверхности – 0...2 мм;
- 3) частота измерений – 184 Гц;
- 4) диаметр пятна на поверхности – 10 мкм;
- 5) среднее расстояние от щупа до объекта – 50 мм.

Результаты исследования

Измерение микрорельефа поверхностей нового и после трехкратного, пятикратного и семикратного использования полиров производили на сканирующем интерференционном щупе. Начало отсчета определяли базовой поверхностью плоскопараллельной пластины, которая была прикреплена к исследуемой поверхности полира. Измерялась величина расстояния до поверхности полира при смещении его вдоль оси OX с шагом 50 мкм. Исследовалась область рабочей части полира, равная 1000 мкм. Искомой величиной являлся зазор между плоскопараллельной пластинкой и контролируемой поверхностью. К интерферометру прилагалось специальное программное обеспечение, которое давало возможность демонстрировать наблюдаемые изображения и переводить их в двухмерную и трехмерную копии. На рис. 2 показаны результаты эксперимента.

Полиры фиксировали на рабочей плоскости микрометрического столика ST-111. Поверхность полира ориентировали таким образом, чтобы световой луч падал под углом $\theta = 0^\circ$, и для каждой точки производили 50 измерений. Диаметр пятна на поверхности $d = 10$ мкм. Интерференционная картина была представлена картиной нерегулярных волновых фронтов при падении низкокогерентного излучения на поверхность полира. В эксперименте фиксировали факт появления контрастной картины интерференционного поля.

Из рис. 2 следует, что значения микрорельефа поверхности нового полира находятся в диапазоне от 125 до 130 мкм, а значения микрорельефа поверхности полиров после трехкратного – от 130 до 145 мкм, после пятикратного – от 140 до 155 мкм, после семикратного – от 150 до 160 мкм использования и автоклавирувания. Это означает,



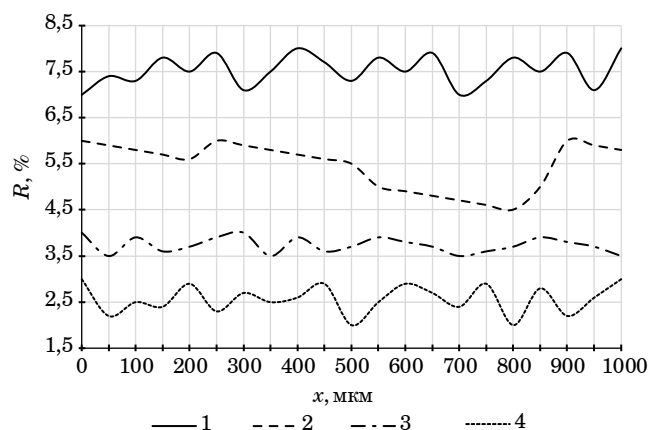
• Рис. 2. Результаты измерений расстояния до поверхности полиров: 1 – поверхность нового полира; 2 – поверхность полира после трех циклов использования и автоклавирования; 3 – поверхность полира после пяти циклов использования и автоклавирования; 4 – поверхность полира после семи циклов использования и автоклавирования

• Fig. 2. Measurement results of the distance to the surface of the polishes: 1 – the surface of the new polish; 2 – the surface of the polish after three cycles of use and autoclaving; 3 – the surface of the polish after five cycles of use and autoclaving; 4 – the surface of the polish after seven cycles of use and autoclaving

что полиры для удаления излишков композитного материала и контурирования поверхности могут обладать эффективной режущей способностью при многократном использовании и автоклавировании, пригодны для повторного применения при выполнении прямых реставраций из композитов, так как шероховатость поверхности изменяется незначительно и в большую сторону, утилизировать данный инструмент после однократного использования нет необходимости.

Важным вопросом является получение информации об распределении коэффициента отражения от исследуемых поверхностей (рис. 3). Зондировалась поверхность по координате $0X$. В этом режиме измерений изменение разности хода в ветвях интерферометра позволяло получить графические зависимости коэффициента отражения в поперечном направлении (от координаты X). Амплитуда интерференционного сигнала пропорциональна коэффициенту отражения нерассеянной компоненты от оптической неоднородности, положение которой определяется равенством длин в ветвях интерферометра.

Экспериментальные результаты показывают, что для снятия излишков композита, контурирования стеклоиономерных и компомерных реставраций оба полира могут использоваться. Безусловно, шероховатость поверхности нового полира от таковой полира, который подвергся автоклавированию, отличается. Но отличия незначительные, и трехкратно, пятикратно и семикратно автоклавированные полиры могут применяться повторно.



• Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента отражения в поперечном направлении: 1 – поверхность нового полира; 2 – поверхность полира после трех циклов использования и автоклавирования; 3 – поверхность полира после пяти циклов использования и автоклавирования; 4 – поверхность полира после семи циклов использования и автоклавирования

• Fig. 3. Experimental dependences of the reflection coefficient in the transverse direction: 1 – the surface of the new polish; 2 – the surface of the polish after three cycles of use and autoclaving; 3 – the surface of the polish after five cycles of use and autoclaving; 4 – the surface of the polish after seven cycles of use and autoclaving

Полученные результаты позволяют стоматологическим клиникам существенно сократить расходы на приобретение шлифованных и полированных ротационных инструментов.

Измерения подобного типа позволяют существенно расширить возможности данных приборов при контроле не только поверхностей инструментария, но и при различного рода топографических исследованиях.

Заключение

В работе определены значения микрорельефа поверхности полиров до и после многократного использования и автоклавирования. Получены распределения коэффициента отражения в поперечном направлении для каждой поверхности полира. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что полиры при многократном использовании и автоклавировании пригодны для контурирования прямых реставраций при восстановлении дефектов твердых тканей зуба, так как шероховатость поверхности и коэффициент отражения изменяются незначительно, и утилизировать данные инструменты после однократного применения нет необходимости.

Результаты работы могут представлять интерес для медицины, в частности, терапевтической стоматологии, а также для оптического приборостроения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. М.: Изд-во стандартов. 1982.
2. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
3. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
4. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пурыев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
5. Оптико-механические приборы / С. В. Кулагин [и др.]. М.: Машиностроение, 1984. 352 с.
6. Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой / Ю. М. Бородянский [и др.] // Приборы. 2022. № 5 (263). С. 3–7.
7. Исследование разработанного интерференционного зонда для измерения неровностей реальных поверхностей / А. В. Арефьев [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 2. С. 1–6. Doi: 10.25791/pribor.2.2022.1319.
8. Майоров Е. Е. Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всерос. науч. конф. (СПб., 18–22 апр. 2023 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 65–68.
9. Пространственное микросканирование поверхности плоскопараллельных стеклянных пластинок интерференционным методом / Е. Е. Майоров [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 688–695. Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.
10. Интерференционный метод в исследовании поверхности микроканалов полимерных и кварцевых микрофлюидных чипов / Е. Е. Майоров [и др.] // Приборы. 2024. № 2. С. 28–32.
11. Effect of preheating on mechanical properties of different commercially available dental resin composites / T. V. Melkumyan [et al.] // International journal of biomedicine. 2023. Vol. 13, № 4. P. 317–322.
12. Исаева Т. М. Еще раз о проблеме цвета в эстетической стоматологии. Возвращаясь к технике реставрации зубов // Клин. стоматол. 2003. № 4. С. 22–24.
13. Шмидседер Д. Эстетическая стоматология: атлас. М.: Медпрессинформ, 2004. 320 с.
14. Дуглас А. Т. Возможности цвета: создание высоко-диффузных слоев с композитом // Клин. стоматол. 2004. № 2. С. 4–11.
15. Луцкая И. К. Практическая стоматология. Минск: Бел. наука, 1999. 360 с.

REFERENCES

1. GOST 25142-82. Surface roughness. Moscow: Publishing house of standards; 1982. (In Russ.).
2. Malakara D. Optical production control; trans. from English eds by A. N. Sosnova. Moscow: Mechanical engineering; 1985. 340 p. (In Russ.).
3. Akhmanov S. A., Dyakov Yu. E., Chirkin A. S. Introduction to statistical radiophysics and optics. Moscow; 1981. 640 p. (In Russ.).
4. Kreopalova G. V., Lazareva N. L., Puryaev D. T. Optical measurements. Moscow: Mechanical Engineering; 1987. 264 p. (In Russ.).
5. Kulagin S. V. et al. Optical and mechanical devices. Moscow: Mechanical engineering; 1984. 352 p. (In Russ.).
6. Borodyansky Yu. M., Mayorov E. E., Petrova E. A., Popova E. V., Kurlov V. V., Udakhina S. V. Measurement of geometric parameters of surfaces of complex shape by a low-coherence optical system. Devices. 2022;(5(263)):3–7. (In Russ.).
7. Arefyev A. V., Kotskovich V. B., Mayorov E. E., Pushkina V. P., Sorokin A. A., Udakhina S. V. Investigation of the developed interference probe for measuring irregularities of real surfaces. Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2022;(2):1–6. (In Russ.). Doi: 10.25791/pribor.2.2022.1319.
8. Majorov E. E. Investigation of complex shapes of surfaces by a coherently time-limited system. Modeling and situational quality management of complex systems: The Fourth All-Russian scientific conference (SPb., 18–22 April 2023). SPb.: SUAI; 2023, pp. 65–68. (In Russ.).
9. Mayorov E. E., Borodyansky Yu. M., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Pushkina V. P., Guliyev R. B. Spatial microscanning of the surface of plane-parallel glass plates by the interference method. Izv. vuzov. Instrumentation. 2023;66(8):688–695. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.
10. Mayorov E. E., Arefyev A. V., Guliyev R. B., Pushkina V. P., Dagaev A. V. Interference method in the study of the surface of microchannels of polymer and quartz microfluidic chips. Devices. 2024;(2):28–32 (In Russ.).
11. Melkumyan T. V., Sheraliava S. Sh., Mendosa E. Yu., Khabadze Z. S., Makeeva M. K., Kamilov N. Kh., Musoshayhova Sh. K., Dadamova A. D., Shakirov Sh. M., Mukhamedov A. A. Effect of preheating on mechanical properties

- of different commercially available dental resin composites. *International journal of biomedicine*. 2023;13(4):317–322.
12. Isaeva T. M. Once again about the problem of color in aesthetic dentistry. Returning to the technique of dental restoration. *Clinical dentistry*. 2003;(4):22–24. (In Russ.).
13. Schmidseider D. *Aesthetic dentistry: atlas*. Moscow: Medpressinform; 2004. 320 p. (In Russ.).
14. Douglas A. T. Possibilities of color: creation of highly diffuse layers with composite. *Clinical dentistry*. 2004;(2):4–11. (In Russ.).
15. Lutskey I. K. *Practical dentistry*. Minsk: Bel. nauka; 1999. 360 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Майоров Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Жулега Ирина Анатольевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики высокотехнологичных производств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – экономика, инноватика.

Новиков Андрей Владимирович, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономических наук и внешнеэкономической деятельности Ивангородского гуманитарно-технического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Область научных интересов – экономика, инноватика.

Maiorov Evgeny E., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – physical optics, optical instrumentation.

Zhulega Irina A., D. Sc. in Economics, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Economics of High-Tech Industries, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – economics, innovation.

Novikov Andrey V., D. Sc. in Economics, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Socio-economic Sciences and Foreign Economic Activity, Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation”.

Research interests – economics, innovation.

Поступила в редакцию 26.08.2024

Поступила после рецензирования 30.08.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Received 26.08.2024

Revised 30.08.2024

Accepted 10.10.2024

Научная статья
УДК 543.42

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-51-58

Применение методов оптической спектроскопии в задачах идентификации и контроля микропластика

Вениамин Вадимович Китаев¹

✉ kitaev.veniamin@mail.ru, orcid.org/0009-0000-6265-1931, SPIN-код: 6841-9288

Василий Иванович Казаков¹

vasilykazakov@mail.ru, orcid.org/0009-0006-1442-7429, SPIN-код: 6933-2170

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Описаны теоретические методы определения химических характеристик микропластика с использованием спектроскопии. Рассмотрена технология выявления спектральной характеристики микропластика с применением методов инфракрасной спектроскопии с фурье-преобразованием, рамановской спектроскопии и метода лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии.

Ключевые слова: экология, загрязнение микропластиком, оптическая спектроскопия, многоканальный спектральный оптический прибор, рамановская спектроскопия, инфракрасная спектроскопия с фурье-преобразованием, метод лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Для цитирования: Китаев В. В., Казаков В. И. Применение методов оптической спектроскопии в задачах идентификации и контроля микропластика // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 51–58. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-51-58.

Original article

Application of optical spectroscopy methods in problems of identification and control of microplastics

Veniamin V. Kitaev¹

✉ kitaev.veniamin@mail.ru, orcid.org/0009-0000-6265-1931, SPIN-code: 6841-9288

Vasily I. Kazakov¹

vasilykazakov@mail.ru, orcid.org/0009-0006-1442-7429, SPIN-code: 6933-2170

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Theoretical methods for determining chemical characteristics of microplastics using spectroscopy are described. The technology of revealing the spectral characteristic of microplastic using Fourier-transform infrared spectrometry, Raman spectrometry and laser-induced emission spectroscopy methods is described.

Keywords: ecology, microplastic pollution, optical spectroscopy, multichannel spectral optical device, Raman spectrometry, Fourier transform infrared spectrometry, laser-induced emission spectroscopy method

Acknowledgements. This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement no. FSRF-2023-0003 "Fundamental bases for construction of jam-proof systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

For citation: Kitaev V. V., Kazakov V. I. Application of optical spectroscopy methods in problems of identification and control of microplastics. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):51–58. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-51-58.

Введение

Проблема загрязнения бассейнов Мирового океана микропластиком становится все актуальнее ввиду того, что пластик нашел широкое применение в деятельности человека. Ежегодное производство пластика в мире достигает более

300 млн тонн в год, из данного объема только 9 % перерабатывается, 12 % сжигается, и 79 % пластика оказывается на свалках или в окружающей среде и становится источником микропластика. Часть из этого объема попадает в Мировой океан, что, по подсчетам ученых, может составлять 8 млн тонн в год.

Микропластик – любой тип пластикового фрагмента определенного размера. В настоящее время еще окончательно не сформировано определение, какого размера частицы относить к микропластику. Большинство исследователей придерживаются по данному вопросу следующего размерного диапазона при определении частиц микропластика – от 0,1 до 5 мм [1, 2]. Существует несколько видов пластика: полиэтилентерефталат ((C₁₀H₈O₄)_n), полиэтилен высокой и низкой плотности ((C₂H₄)_n), поливинилхлорид ((C₂H₃Cl)_n), полипропилен ((C₃H₆)_n), полистирол ((C₈H₈)_n), полиамид (C₁₂H₂₂N₂O₂)_n, поликарбонат (–O–R–O–CO–)_n, АБС-пластик (C₈H₈·C₄H₆·C₃H₃N)_n, полиацеталь (CH₂O)_n и прочие виды пластмасс. Возникновение микропластика может быть классифицировано в соответствии с вызывающими его агентами:

- биodeградация, связанная с деятельностью живых организмов, прежде всего, микробов;
- фотodeградация, вызываемая солнечной активностью;
- термоокисление, происходящее под действием температур;
- гидролиз – реакция с водной средой.

В отличие от органических отходов, пластиковые частицы не разлагаются в природе, что приводит к их накоплению в окружающей среде. Микропластик является одним из самых распространенных и опасных загрязнителей окружающей среды, так как может попадать в почву, воду и даже воздух, представляя угрозу для флоры и фауны нашей планеты, так как может стать кормом для мелких организмов. Впоследствии в результате накопительного эффекта в пищевой цепочке это приводит к попаданию его в организм крупной рыбы и живых организмов, что в определенных случаях может приводить к серьезным заболеваниям нервной и сердечно-сосудистой систем. Данные частицы могут стать носителем тяжелых металлов, участвовать в их миграции в окружающей среде. В окружающей среде в микропластике накапливаются различные виды металлов, такие как обменные, восстанавливаемые, окисляемые и остаточные. Двумя основными возможными источниками загрязнения микропластика тяжелыми металлами выступают те, которые поступают в результате производственного процесса в качестве добавок и в результате сорбции из окружающей среды. Некоторые исследования показали, что металлы добавляются при производстве пластмасс в качестве красителей (Mn, Cd, Pb, Ti), наполнителей (Ba, Ca, Mg) и катализаторов (Mo, P, Pb, Sr, Zn), могут адсорбироваться из окружающей среды такие металлы, как Pb, Cu, Sn, Mo, Sr, которые встречаются в естественной морской среде [3, 4].

Так как микропластик представляет собой очень неоднородную группу частиц, которые значительно различаются по размерам, формам, цветам, плотностью и могут состоять из широкого круга синтетических полимеров, то универсальные методики для их качественного и количественного анализа предстоит разработать. Наиболее разработанными физико-химическими методами анализа микропластика являются инфракрасная спектromетрия с преобразованием Фурье и рамановская спектromетрия, пиролизная газовая хроматография – масс-спектromетрия, термogravиметрический анализ, а также подходы, основанные на жидкостной хроматографии, микрофлуориметрии, аналитической сканирующей и трансмиссионной электронной микроскопии и др. [5]. Следует отметить, что все перечисленные выше методы анализа занимают определенное время и требуют серьезной пробоподготовки образца, что не позволяет использовать их в качестве инструмента экспресс-анализа.

В данной работе предлагается рассмотреть методы прикладной оптической спектromетрии для разработки метода экспресс-диагностики наличия микропластика, которые уже нашли широкое применение в различных задачах контроля, например, физических и технологических процессов [6, 7].

Инфракрасная спектроскопия с фурье-преобразованием

Инфракрасная (ИК) спектроскопия с использованием преобразования Фурье – это метод колебательной спектроскопии широкого применения, используемый для идентификации, анализа структуры и количества компонентов, включая те, что присутствуют в пищевых продуктах. Этот метод является неразрушающим, позволяя изучать образец многократно и применять в дальнейшем другие аналитические методы, включая химические и визуальные. Инфракрасная спектроскопия с применением преобразования Фурье включает в себя обработку образца полихроматическим инфракрасным излучением в диапазоне длин волн от 400 до 4000 см⁻¹, где регистрируется изменение интерференции волн света, прошедшего через образец и контрольный (опорный) луч, в интерферометре с подвижным зеркалом (интерферометр Майкельсона). Результат этого процесса – фурье-изображение объекта, которое может быть представлено в виде суммы гармонических функций на основе полос поглощения в ИК-спектре путем использования обратного преобразования Фурье.

Поглощение инфракрасного излучения органическими молекулами обусловлено наличием колебательных квантовых переходов, зависящих от дипольного момента химических связей. При этом если в области приблизительно $4000\text{--}2500\text{ см}^{-1}$ располагаются полосы поглощения простых (валентных) колебаний связей С–С; С–О; С=О; С–Н; О–Н, N–H, то более длинноволновая область $2500\text{--}400\text{ см}^{-1}$ соответствует совокупности разнообразных сложных по конфигурации «крутильных», «веерных», «ножничных», «мятниковых» колебаний молекулы, что проявляется в сложном наборе пиков, представляющем характеристический «спектральный отпечаток» полимера [5]. Наиболее распространенным при анализе микропластика аппаратным оформлением метода является инфракрасная спектроскопия с использованием преобразования Фурье с интеграцией оптического микроскопа. Существуют три основных режима: зеркальное отражение, пропускание и нарушенное полное внутреннее отражение (НПВО).

Режим зеркального отражения используется для относительно крупных, толстых, непрозрачных единичных частиц микропластика. В данном случае могут возникать проблемы, связанные со слабым сигналом, плохим совпадением с базами данных стандартных образцов, высоким уровнем шума и низкой точностью [8].

Режим пропускания обладает высокой чувствительностью, для него менее важен размер частиц микропластика, и он позволяет получать спектры высокого качества. Недостатком данного режима является то, что при толщине образца менее 5 мкм точность снижается [8].

Режим нарушенного полного внутреннего отражения реализуется путем приведения частицы образца в контакт с зондом из инфракрасного – прозрачного – материала с высоким показателем преломления (например, алмаза, германия). Из-за эффекта часть инфракрасного сигнала, многократно отраженного на межфазной границе «зонд – образец», теряется в степени, зависящей от длины волны излучения. Данный режим отличается наилучшим качеством получаемых спектров и минимальным количеством помех от примесей в изучаемом образце. Однако он применим только к микропластику, допускающему точное индивидуальное плотное подведение, требует наибольшего времени для снятия спектра [9].

Основным ограничением метода инфракрасной спектроскопии с использованием преобразования Фурье является наличие помех со стороны даже следового количества воды в образце, поскольку очень интенсивные и широкие полосы колебаний О–Н-связей в ее молекуле способны перекрыть большую часть нужного для анализа спектра в об-

ласти простых колебаний. С помощью инфракрасной спектроскопии с использованием преобразования Фурье трудно анализировать непрозрачные или черные образцы микропластика. По сравнению с другими методами (визуальная сортировка, темнопольная флуоресцентная микроскопия, рамановская микроспектротометрия), снятие спектра для каждой индивидуальной частицы требует в $8\text{--}10$ раз большего времени. Режим нарушенного полного внутреннего отражения частично лишен этих недостатков, но он обычно используется для частиц микропластика размером $>500\text{ мкм}$ и, по-видимому, совершенно не подходит для идентификации микропластика размером $<20\text{ мкм}$ [10] и исследует только тонкий приповерхностный слой образца, чувствительность к поверхностному старению образцов микропластика и образованию на нем адсорбционных слоев и биопленок [8].

В большинстве случаев инфракрасная спектроскопия с использованием преобразования Фурье выполняется непосредственно на фильтрах, которые использовались для осаждения материалов на изучаемом образце. Для исследований в режиме отражения и нарушенного полного внутреннего отражения материал фильтра не имеет принципиального значения при условии точной фокусировки на выбранном материале. Однако возможны помехи со стороны инфракрасного спектра материала подложки, если частицы материала слишком малы. В таком случае можно использовать фильтры с нанесенным проводящим металлическим слоем.

Теоретически пространственное разрешение для отдельных частиц ограничено дифракционным пределом для световых инфракрасных волн и составляет от $1\text{--}7\text{ мкм}$ при 4000 см^{-1} до 13 мкм при 500 см^{-1} . Однако на практике возможно исследовать только индивидуальные частицы размером не менее $10\text{--}20\text{ мкм}$. При снятии спектра пропускания с выделенной области фильтра размер частиц не имеет существенного значения (можно исследовать одновременно множество мелких частиц).

Снятие спектров инфракрасной спектроскопии с использованием преобразования Фурье от множества отдельных частиц микропластика, осажденных на фильтре, может потребовать неприемлемо большого времени (десятки часов на один образец). Эти ограничения частично преодолеваются при спектрометрии с так называемым матричным детектором в фокальной плоскости. Спектры при этом могут сниматься в режимах отражения и НПВО, однако чаще всего применяется режим пропускания, предъявляющий высокие требования к инфракрасной прозрачности подложки. Сообщается об использовании при этом инфракрасных прозрачных фильтров из кремния, оксида алюминия или селенида цинка.

Рамановская спектроскопия

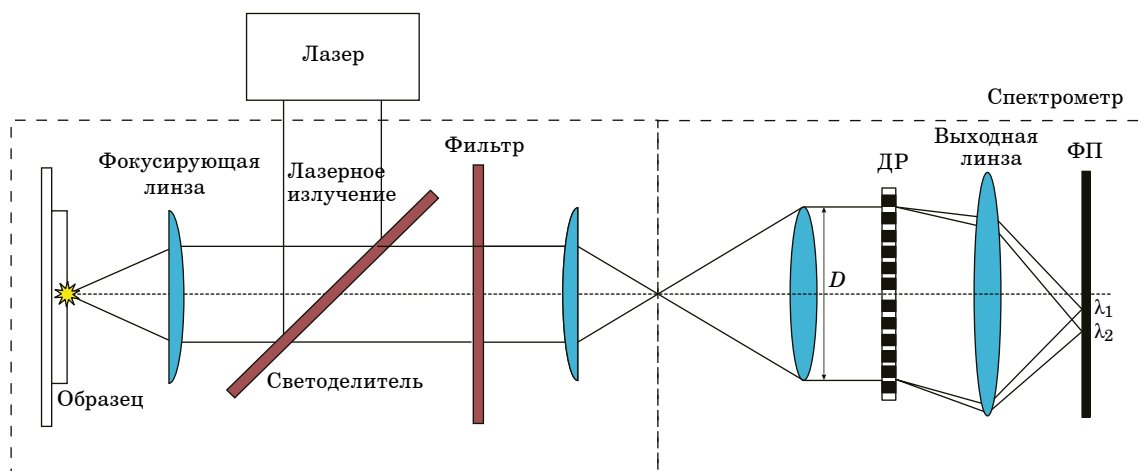
Спектроскопия комбинационного рассеяния использует эффект неупругого взаимодействия фотонов с колебательными квантовыми уровнями молекул, при котором энергия вторичных (рассеянных) фотонов начинает несколько различаться (в большую или меньшую сторону) от исходной, и в спектре излучения появляются дополнительные гармоники (полосы), являющиеся в совокупности специфическим «спектральным отпечатком» молекулы. Поскольку энергия колебательных переходов обычно крайне мала по сравнению с энергией квантов рассеиваемого излучения, и интенсивность дополнительных пиков также невелика, на практике для наблюдения комбинационного рассеяния (или раман-эффекта, названного так в честь открывшего это явление Ч.-В. Рамана) используют исключительно монохроматическое лазерное излучение (обычно в видимой области спектра, от 500 до 800 нм). Фундаментальное физическое различие между инфракрасной спектроскопией с использованием преобразования Фурье и рамановской спектроскопией состоит в следующем: если инфракрасное поглощение зависит от изменения дипольного момента химической связи, то проявление раман-эффекта обусловлено изменением поляризуемости химической связи. Поэтому если в первом случае наиболее интенсивные пики дают колебательные переходы полярных связей, т. е. C–O, C=O, C–N, O–H, то во втором – связей C=C и ароматических ядер молекул [5]. На рис. 1 показана схема, реализующая метод рамановской спектроскопии.

В большинстве современных работ микропластик анализируется с помощью микрорамановских спектрометров, интегрированных со светоптическим или конфокальным микроскопом, что

позволяет подвести лазерный луч к каждой частице и снять ее спектр [11]. Рамановский микроскоп оснащается двумя лазерами с длинами волн 785 нм (темно-красный) и 532 нм (зеленый) и дает оптическое увеличение в пределах $\times 100$ – 1000 . Для более надежной идентификации микропластика его спектр снимают дважды при облучении обоими лазерами. Также сообщается о применении в рамановской микроспектрометрии лазеров с длиной волны 442, 455, 514,5 и 633 нм [9].

Рамановская спектрометрия имеет ряд преимуществ, из которых главным, по сравнению с инфракрасной спектроскопией с использованием преобразования Фурье, является малый размер анализируемых частиц. Пространственное разрешение рамановского спектрометра составляет порядка 1 мкм, так как лазерный свет находится в видимой области. Поэтому рамановская спектроскопия широко используется для идентификации микропластика с размером частиц менее 20 мкм. Имеются даже данные об успешном анализе индивидуальных частиц нанопластика диаметром 500 нм. Рамановская спектрометрия, по сравнению с инфракрасной спектроскопией, обладает более широким спектральным диапазоном (4000 – 40 см⁻¹), меньшим уровнем шумов и наличием более узких спектральных полос, что позволяет надежно идентифицировать ряд полимеров, дающих слабый или неспецифический отклик на инфракрасном спектрометре. Образцы для анализа рамановской спектроскопией не требуются глубоко обезвоживать перед исследованием, так как она имеет сравнительно низкую чувствительность спектров к помехам со стороны ОН-групп воды [5].

Рамановская спектроскопия микропластика имеет некоторые ограничения. Использование метода исключается для образцов, обладающих флуоресценцией в видимой области, так как ши-



• Рис. 1. Схема использования метода рамановской спектроскопии
 • Fig. 1. Scheme of using the Raman spectroscopy method

рокие полосы эмиссии флуоресценции способны полностью перекрыть и заглушить слабые линии рамановских спектров. Также рамановские спектры, создаваемые добавками в микропластик и адсорбированными примесями, могут перекрываться со спектрами самих полимеров, что мешает их идентификации. Время снятия одного рамановского спектра относительно велико, поскольку может потребовать предварительного ручного выбора микропластика и его визуализации. На практике это приводит к тому, что анализу подвергаются очень небольшую часть образца (<1 % поверхности фильтра), что связано с большой ошибкой при экстраполяции на остальную часть пробы. Мощный лазерный луч, сфокусированный на образцах микропластика, может вызвать его нагрев, плавление, деформацию, фотодеградацию или термодеструкцию, что не позволяет считать метод в полном смысле неразрушающим и использовать другие методы определения состава [5].

Метод лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии в задаче исследования микропластика

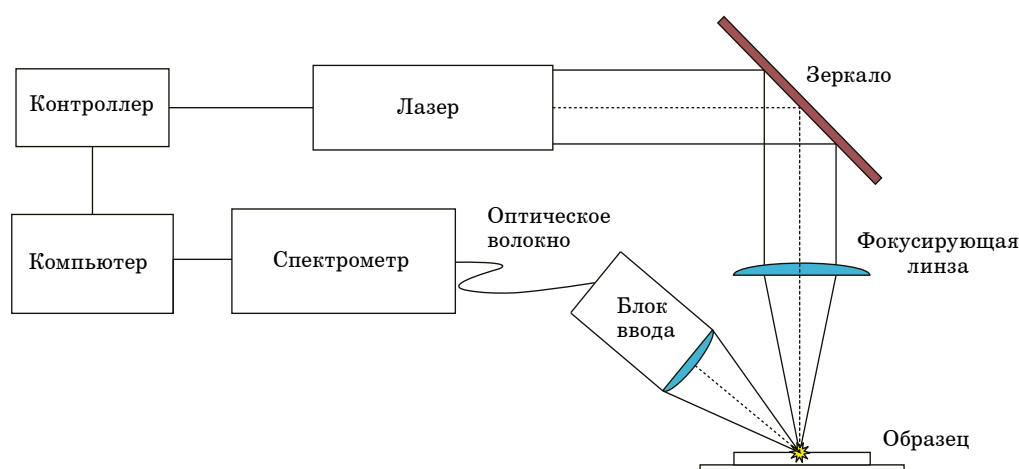
При лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) [12] используется импульсный лазер с высокой пиковой мощностью для облучения образца с фокусировкой луча на маленьком пятне (обычно 10–400 мк в диаметре). В области пятна лазерного облучения происходит абляция материала образца с образованием облака наночастиц над ним, но поскольку пиковая энергия лазерного луча довольно высока, эффекты поглощения и многофотонной ионизации увеличивают непрозрачность газовых и аэро-

зольных облаков, лазерная энергия значительно поглощается облаком, постепенно формируя плазму. Излучение высокоэнергетической плазмы может быть зарегистрировано детектором и записано в виде спектра, который может быть проанализирован для получения информации о том, какие элементы присутствуют в образце. На рис. 2 показана схема, реализующая метод ЛИЭС.

При всех достоинствах и удобствах на данный момент метод ЛИЭС достаточно хорошо разработан и внедрен в технологические процессы при анализе веществ в твердом состоянии [13]. В последнее время метод ЛИЭС получил свое дальнейшее развитие для анализа веществ в жидком состоянии, что продемонстрировано в работе [14]. Это позволяет утверждать, что метод ЛИЭС может быть успешно применен в задаче обнаружения частиц микропластика и его примесей в водной среде.

В работе [15] метод ЛИЭС были применен для количественной оценки и детектирования элементов, входящих в состав микропластика в твердой фазе. Данный метод успешно применяется для одновременного определения мультиметаллов в отдельных пробах микропластиков, а также таких металлов, как медь (Cu), свинец (Pb), железо (Fe), кадмий (Cd), цинк (Zn), марганец (Mn) и хром (Cr) [15]. Источники обнаруженных металлов и их потенциальное происхождение были описаны с помощью статистического анализа. В таблице приведена сводная характеристика спектральных линий некоторых веществ, входящих в состав микропластика.

Как видно из данных таблицы, спектральные линии анализируемых элементов расположены в достаточно широком диапазоне длин волн (213,8...777,2 нм). Современные дифракционные



- Рис. 2. Схема использования метода ЛИЭС
- Fig. 2. Scheme of application of the LIBS method

- Атомные линии исследуемых элементов
- Atomic lines of the investigated elements

Вещество	Химическая формула	Длина волны, нм
Для пластика		
Диуглерод	C ₂	516,5
		473,7
		563,5
		512,9
Цианиды	CN	388,3
		387,1
		386,2
		385,5
		385,1
Углерод	C	247,8
Водород	H	656,3
Азот	N	746,8
Кислород	O	777,2
Для тяжелых металлов		
Свинец	Pb	283,3
		405,7
Кадмий	Cd	214,4
		226,5
		228,8
Для других металлов		
Медь	Cu	324,7
Железо	Fe	259,9
		371,9
Хром	Cr	425,4
		357,8
Цинк	Zn	213,8
Марганец	Mn	257,6
		403

спектрометры, которые применяются в методе ЛИЭС, не способны обеспечить высокую разрешающую способность на всем диапазоне анализируемых длин волн. Выходом из сложившейся ситуации может стать разработка многоканальной ЛИЭС-системы с применением высокопорядковых дифракционных решеток [16, 17] и одновременного считывания спектрометрической информации в нескольких дифракционных порядках [18].

Заключение

Следует отметить, что спектроскопический метод имеет свои ограничения. Во-первых, он требует достаточно большого количества исследуемого материала, что не всегда возможно при работе с микропластиком. Во-вторых, спектр может быть искажен из-за примесей или других факторов, что может привести к ошибочным результатам. Несмотря на эти ограничения, спектроскопия является важным инструментом для определения микропластика и других загрязнителей в окружающей среде. В сочетании с другими методами анализа, такими как химический анализ и микроскопия, спектроскопия позволяет получить более точную и полную информацию о составе и свойствах микропластика. В дальнейшем на основе материально-технической базы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения планируется проведение экспериментов с образцами микропластика с применением метода лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lost at sea: where is all the plastic? / C. T. Richard [et al.] // Science. 2004. Vol. 304, is. 5672. P. 838. Doi: 10.1126/science.109455.
2. Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean – Corsica) / A. Collignon [et al.] // Marine pollution bulletin. 2014. Vol. 79, is. 1–2. P. 293–298.
3. Зобков М. Б., Есюкова Е. Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов / Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Атлант. отд.-е. Калининград, 2017.
4. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea / M. B. Zobkov [et al.] // Marine pollution bulletin. 2019. Vol. 138. P. 193–205. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.04.
5. Методы идентификации и количественного анализа микропластиков в пищевых продуктах / И. В. Гмошинский [и др.] // Вопросы питания. 2023. Т. 92, № 5 (549). С. 87–102.
6. Vaganov M. A., Moskaletz O. D., Kazakov V. I. Automatic control system of combustion processes based on the methods of contactless optical spectroscopy // Proceedings of SPIE – The International society for optical engineering. Optical measurement systems for industrial inspection XI. 2019. P. 110563A.
7. Москалец О. Д., Казаков В. И., Кулаков С. В. Формирование и считывание спектроскопической информации в системе анализа спектра на базе дифракционной решетки // Датчики и системы. 2019. № 11 (241). С. 11–16.

8. Yong C. Q. Y., Valiyaveettil S., Tang B. L. Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems. *Int. j. environ. res. public health*. 2020. Vol. 17, № 5. P. 1509.
9. Ivleva N. P. Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: challenges, advanced methods, and perspectives // *Chem. rev.* 2021. Vol. 121, № 19. P. 886–936.
10. Gong J., Xie P. Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics // *Chemosphere*. 2020. № 254. P. 126790.
11. Optimization, performance, and application of a pyrolysis-GC/MS method for the identification of microplastics / L. Hermabessiere [et al.] // *Anal bioanal chem.* 2018. Vol. 410, № 25. P. 6663–6676.
12. Кремерс Д., Радзиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. М.: Техносфера, 2009. 358 с.
13. Мисникова Т. С. Контроль качества медной руды с помощью метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии // *Инновационное приборостроение*. 2024. Т. 3, № 1. С. 22–27. Doi: 10.31799/2949-0693-2024-1-22-27.
14. Плаксин М. К., Мишустин Г. В., Лебедев В. Ф. Разработка физико-технических основ анализа химического состава вина методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии // *Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Труды XVI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Суздаль). М.: НТЦ УП РАН, 2023. С. 249–252.*
15. Chamradová I., Pořízka P., Kaiser J. Laser-induced breakdown spectroscopy analysis of polymers in three different atmospheres. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2021.107079> (дата обращения: 26.03.2024).
16. Казаков В. И., Москалец О. Д. Комплексные спектры в дифракционном решеточном спектральном приборе // *Радиопромышленность*. 2016. № 4. С. 32.
17. Казаков В. И., Москалец О. Д. Измерение оптических спектров решеточным спектральным прибором в высших дифракционных порядках // *Датчики и системы*. 2018. № 12. С. 22–27.
18. Reading, processing and correction of spectroscopic information in a diffraction grating spectral device / L. N. Preslnev, V. I. Kazakov, A. S. Paraskun, M. A. Vaganov // *2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF)*. IEEE. 2018. P. 8604412.

REFERENCES

1. Richard C. T., Ylva O., Mitchell R. P., Davis A., Rowland S. J., John A. W. G., Mcgonigle D., Russell A. E. Lost at sea: where is all the plastic?. *Science*. 2004;304(5672):838. Doi: 10.1126/science.109455.
2. Collignon A. et al. Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean – Corsica). *Marine pollution bulletin*. 2014;79(1–2):293–298.
3. Zobkov M. B., Yesyukova E. E. Microplastics in the marine environment: a review of methods of sampling, preparation and analysis of water, bottom sediments and coastal sediments; Shirshov Institute of Oceanology RAS. Kaliningrad; 2017. (In Russ.).
4. Zobkov M. B., Esiukova E. E., Zyubin A. Y., Samusev I. G. Microplastic content variation in water column: The observations employing a novel sampling tool in stratified Baltic Sea. *Marine pollution bulletin*. 2019;138:193–205. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.047.
5. Gmshinsky I. V. et al. Methods of identification and quantitative analysis of microplastics in food products. *Nutrition issues*. 2023;92(5(549)):87–102. (In Russ.).
6. Vaganov M. A., Moskaletz O. D., Kazakov V. I. Automatic control system of combustion processes based on the methods of contactless optical spectroscopy. *Proceedings of SPIE – The International society for optical engineering. Optical measurement systems for industrial inspection XI*. 2019, pp. 110563A.
7. Moskalets O. D., Kazakov V. I., Kulakov S. V. V. Formation and reading of spectroscopic information in the system of spectrum analysis based on the diffraction grating. *Sensors and systems*. 2019;(11(241)):11–16. (In Russ.).
8. Yong C. Q. Y., Valiyaveettil S., Tang B. L. Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems. *Int. j. environ. res. public health*. 2020;17(5):1509.
9. Ivleva N. P. Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: challenges, advanced methods, and perspectives. *Chem. rev.* 2021;121(19):886–936.
10. Gong J., Xie P. Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics. *Chemosphere*. 2020;(254):126790.
11. Hermabessiere L. et al. Optimization, performance, and application of a pyrolysis-GC/MS method for the identification of microplastics. *Anal bioanal chem.* 2018;410(25):6663–6676.
12. Kremers D., Radziemski L. *Laser-Spark emission spectroscopy*. Moscow: Technosphere; 2009. 358 p. (In Russ.).
13. Misnikova T. S. Copper ore quality control by means of the method of laser-spark emission spectroscopy. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):22–27. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2024-1-22-27.

14. Plaksin M. K., Mishustin G. V., Lebedev V. F. Development of physical and technical bases for the analysis of the chemical composition of wine by the method of laser-spark emission spectroscopy. Acousto-optical and radar methods of measurements and information processing: Proceedings of the XVI International scientific and technical conference (Suzdal). Moscow: NTC UP RAN; 2023, pp. 249–252. (In Russ.).
15. Chamradová I., Pořízka P., Kaiser J. Laser-induced breakdown spectroscopy analysis of polymers in three different atmospheres. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107079> [Accessed 26 March 2024].
16. Kazakov V. I., Moskalets O. D. Complex spectra in the diffraction grating spectral device. Radiopromyshlennost. 2016;(4):32. (In Russ.).
17. Kazakov V. I., Moskalets O. D. Measurement of optical spectra by a lattice spectral device in higher diffraction orders. Sensors and systems. 2018;(12):22–27. (In Russ.).
18. Preslenev L. N., Kazakov V. I., Paraskun A. S., Vaganov M. A. Reading, processing and correction of spectroscopic information in a diffraction grating spectral device. 2018 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). IEEE. 2018, pp. 8604412.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Китаев Вениамин Вадимович, аспирант, ассистент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптика, спектроскопические методы и методики.

Казakov Василий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оптика и спектроскопия, квантовые технологии.

Kitaev Veniamin V., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optics, spectroscopic methods and techniques.

Kazakov Vasily I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – optics and spectroscopy, quantum technologies.

Поступила в редакцию 07.10.2024

Поступила после рецензирования 09.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Received 07.10.2024

Revised 09.10.2024

Accepted 10.10.2024

Сравнительный анализ применения нейросетевого и нечеткого регуляторов в системе автоматического управления летательного аппарата по углу крена

Михаил Евгеньевич Иванов¹

✉ sindbad1995@list.ru, orcid.org/0000-0002-7584-6946, SPIN-код: 6972-6135

Владимир Васильевич Езерский¹

ezerskiy2010@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1223-6841

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Осуществлен синтез системы автоматического управления (САУ) углом крена летательного аппарата с применением нейросетевого регулятора NARMA L-2. Дано качественное заключение о целесообразности применения данного регулятора в исследуемой САУ, а также проведен сравнительный анализ разработанного нейросетевого регулятора и нечеткого регулятора применительно к данной САУ. Основным показателем качества системы, использованный в ходе сравнения, – конечный переходный процесс, характеризующий устойчивость системы. Критерий оптимальности переходных процессов в рассматриваемом случае – минимум значения перерегулирования и ошибки регулирования. Моделирование проведено в среде Matlab Simulink.

Ключевые слова: сравнительный анализ, система автоматического управления, методы искусственного интеллекта, нейросетевой регулятор, искусственная нейронная сеть, обучение, переходный процесс

Для цитирования: Иванов М. Е., Езерский В. В. Сравнительный анализ применения нейросетевого и нечеткого регуляторов в системе автоматического управления летательного аппарата по углу крена // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 59–64. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-59-64.

Original article

Comparative analysis of using of neural network and fuzzy logic controllers in the automatical control system of an aircraft by roll angle

Mikhail E. Ivanov¹

✉ sindbad1995@list.ru, orcid.org/0000-0002-7584-6946, SPIN-code: 6972-6135

Vladimir V. Ezerskiy¹

ezerskiy2010@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1223-6841

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The synthesis of the roll angle control system of the aircraft using the NARMA L-2 neural network controller has been carried out in this article. The qualitative conclusion is given on using this controller in this researching system, as well as a comparative analysis of the developed neuro controller and fuzzy controller in relation to this system. The main indicator of the quality of system used in the comparative analysis is the transient process characterizing the stability of the system. The criterion for the optimality of transients in this case is the minimum value of overshoot and control error rate. The simulation using Matlab Simulink was carried out.

Keywords: comparative analysis, automatic control system, artificial intelligence, neuro network controller, artificial neuro network, training, transient process

For citation: Ivanov M. E., Ezerskiy V. V. Comparative analysis of using of neural network and fuzzy logic controllers in the automatical control system of an aircraft by roll angle. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):59–64. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-59-64.

Введение

Сегодня методы искусственного интеллекта являются передовым математическим инструментом для решения широкого спектра научно-технических задач, связанных с синтезом оптимальных систем автоматического управления [1, 2].

Требуемое качество этих систем обеспечивается интеллектуальными регуляторами – нейросетевым [3] и нечетким [4], заметно опережающими классический ПИД-регулятор в своих возможностях [5]. В данной статье приведены результаты работы системы автоматического управления (САУ) углом крена летательного аппарата с ней-

росетевым регулятором, а также проведен сравнительный анализ аналогичной САУ с нечетким регулятором, рассмотренной нами ранее в работе [6]

Математическая и программная реализация системы автоматического управления по крену с нейросетевым регулятором

Линеаризованный закон астатического управления элеронами, с помощью которых осуществляется крен летательного аппарата, имеет вид:

$$\delta_{\partial} = K_{i\gamma} \int (\gamma - \gamma_{\text{З}}) dt + K_{\gamma} \gamma + K_{\omega} \omega, \quad (1)$$

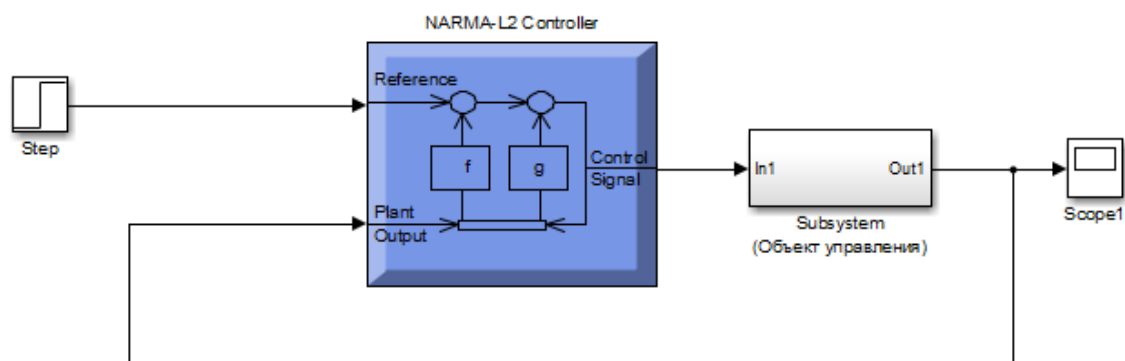
где γ – измеренное на выходе значение угла крена; $\gamma_{\text{З}}$ – требуемое (заданное) значение угла крена; $K_{i\gamma}$ – коэффициент системы, связанный с углом крена; K_{ω} – коэффициент системы, связанный

с угловой скоростью крена; $K_{\gamma} \gamma$ – корректирующее звено для обеспечения устойчивости САУ.

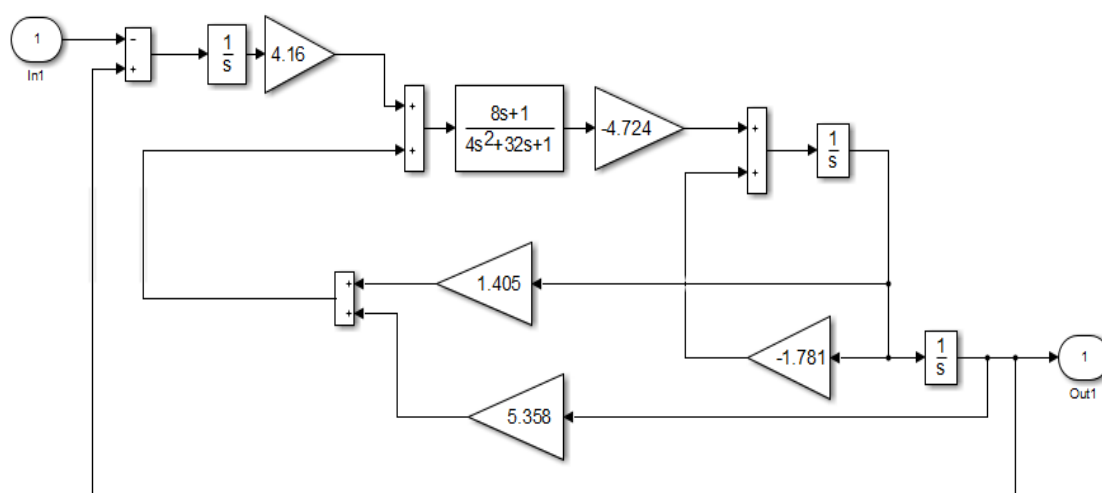
На рис. 1 показана структурная схема исследуемой САУ угла крена с нейросетевым регулятором.

Схема объекта управления (элеронов летательного аппарата) САУ по каналу угла крена, определяемая в блоке Subsystem, была рассмотрена ранее в исследовании [6] и изображена на рис. 2. Следует заметить, что и в данном случае показанная схема обладает отрицательной прямой и положительной обратной связями.

Нами был использован нейросетевой регулятор типа NARMA L-2 Controller (Nonlinear Autoregressive Moving Average), применяющий авторегрессионную модель объекта управления со скользящим средним. Данный тип регулятора был выбран потому, что требует наименьших вычислительных ресурсов по сравнению с нейросетевым регулятором, использующим эталонную модель объекта (Model Reference Controller), и предиктивным (предсказательным, NN Predictive



• Рис. 1. Обобщенная структурная схема САУ по крену с нейросетевым регулятором NARMA L-2
 • Fig. 1. Generalized scheme of the roll angle control system with NARMA L-2

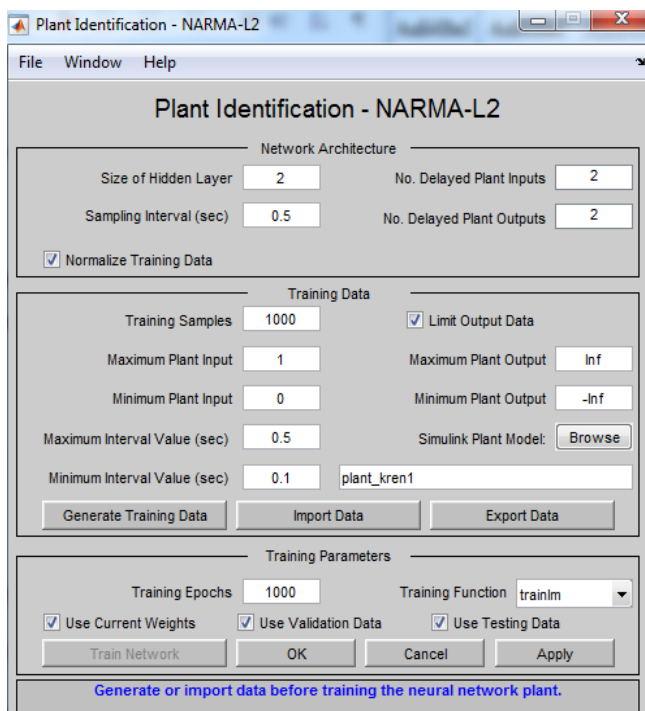


• Рис. 2. Структурная схема объекта управления
 • Fig. 2. Structural scheme of the control object

Controller). Окно настройки регулятора NARMA L-2 показано на рис. 3. Необходимо уточнить следующее: архитектура искусственной нейронной сети, по умолчанию используемой в регуляторе, – сеть прямого распространения (модернизированный однослойный перцептрон Розенблатта с функцией активации типа гиперболического тангенса для входных синапсов и линейной функцией активации для выходных синапсов).

Представленные в окне настройки регулятора параметры формируют целевое качество переходного процесса всей САУ:

- Size of Hidden Layer (количество нейронов скрытого слоя);
- Sampling Interval (интервал времени сбора данных из модели объекта, в секундах);
- No. Delayed Plant Inputs (число элементов запаздывания на входе модели объекта);
- No. Delayed Plant Outputs (число элементов запаздывания на выходе модели объекта);
- Normalize Training Data (приведение обучающей выборки к нормированному диапазону значений [0; 1]);
- Training Samples (количество обучающих примеров в выборке для обучения, тестирования и контроля нейронной сети);
- Minimum Plant Input (минимально допустимое значение входного сигнала объекта);



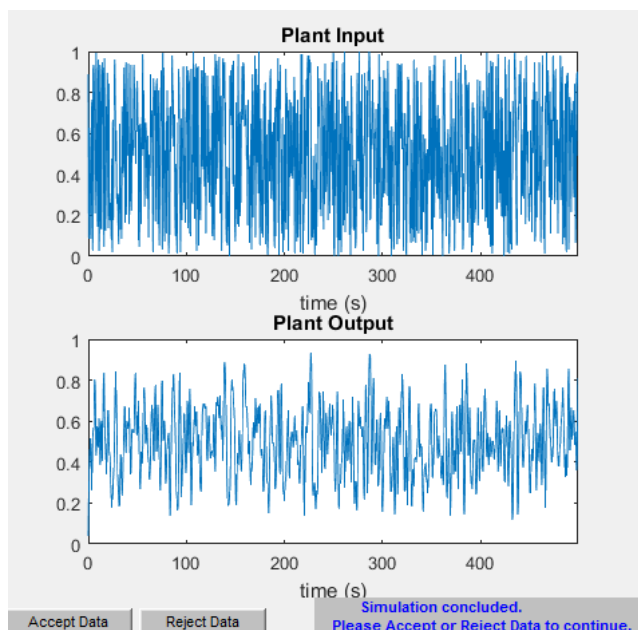
• Рис. 3. Графическое окно настройки регулятора NARMA L-2
 • Fig. 3. The graphical window with settings of NARMA L-2 Controller

- Maximum Plant Input (максимально допустимое значение входного сигнала объекта);
- Minimum Plant Output (минимально допустимое значение выходного сигнала объекта);
- Maximum Plant Output (максимально допустимое значение выходного сигнала объекта);
- Minimum Interval Value (минимальный интервал входного сигнала объекта, в секундах);
- Maximum Interval Value (максимальный интервал входного сигнала объекта, в секундах);
- Training epochs (максимально допустимое число итераций обучения);
- Training Function (обучающая функция, задана как **trainlm** по умолчанию).

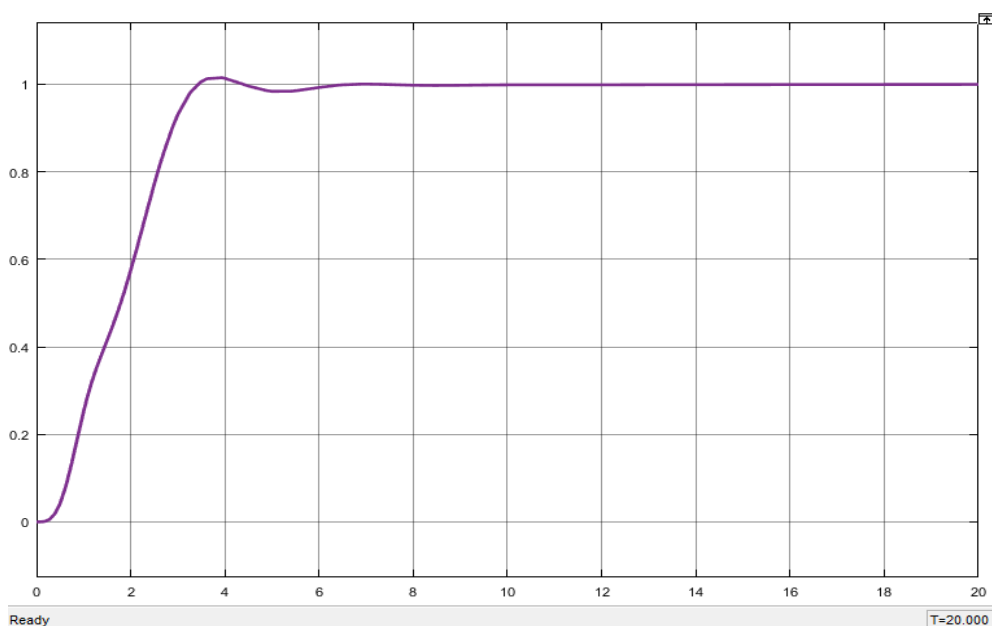
В окне **Simulink Plant Model** установлена отдельно сохраненная модель объекта управления, которая показана на рис. 2, – данный шаг необходим для реализации свойства адаптивности регулятора.

После установки всех необходимых параметров и идентификации Simulink-модели объекта управления были подготовлены данные для обучения нейронной сети регулятора при помощи кнопки **Generate Training Data** (рис. 4). На графиках видно, что при сгенерированных обучающих данных значения на выходе объекта уменьшились по сравнению со входными значениями, что говорит о корректно сформированной обучающей выборке.

После обучения при помощи команды **Training Network** регулятор настроен и готов к использованию. По результатам моделирования исследу-



• Рис. 4. Сформированная обучающая выборка для нейронной сети регулятора
 • Fig. 4. Training data for the neural network controller



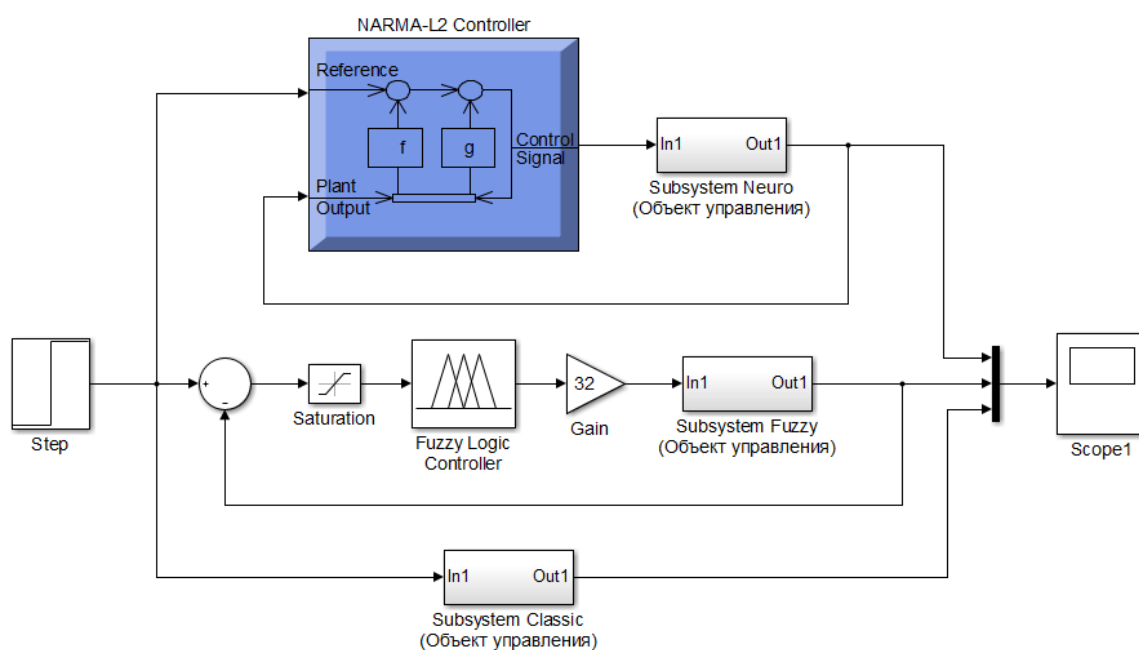
- *Рис. 5. Переходный процесс САУ по углу крена с нейросетевым регулятором*
- *Fig. 5. Transient of the roll angle control system with the neuro network controller*

емой САУ угла крена был получен переходный процесс, который изображен на рис. 5.

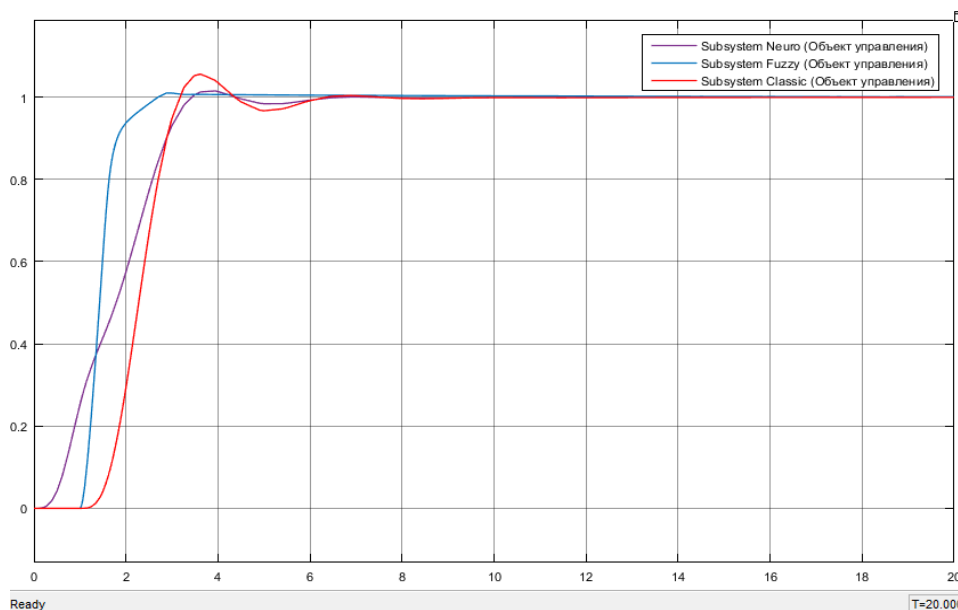
Характер переходного процесса говорит об устойчивости рассматриваемой системы, значение перерегулирования поставило не более 3 % от установившегося значения, время переходного процесса $t_{\Pi} \approx 6,2$ с. Качество полученного переходного процесса позволяет провести дальнейший сравнительный анализ.

Сравнительный анализ рассматриваемой САУ с нейросетевым и нечетким регуляторами

На рис. 6 показана схема, составленная из САУ с нейросетевым и нечетким регуляторами, а также классическая САУ без регуляторов, параллельно подключенных к генератору Step и осциллографу Scope через шину выходных сигналов Mux.



- *Рис. 6. Параллельное соединение нейросетевой, нечеткой и классической САУ угла крена*
- *Fig. 6. Parallel connection of neuro, fuzzy and classical roll angle control systems*



- *Рис. 7. Переходные процессы нейросетевой, нечеткой и классической САУ*
- *Fig. 7. Transients of neuro, fuzzy and classical roll angle control systems*

Структура нечеткого регулятора Fuzzy Logic Controller и алгоритм его настройки были описаны нами ранее в статье [6], эти же параметры использованы и в текущем исследовании.

Переходные процессы всех трех систем управления показаны на рис. 7 (фиолетовая кривая – для рассматриваемой нейросетевой САУ, синяя кривая – для нечеткой САУ, красная кривая – переходный процесс классической САУ).

По результатам моделирования был сделан следующий вывод: применение регуляторов с элементами искусственного интеллекта (нечеткий и нейросетевой регуляторы) в САУ угла крена в обоих случаях позволило улучшить качество (снизить время стабилизации системы и уменьшить значение перерегулирования) по сравнению с классической САУ без регуляторов. Однако нейросетевой регулятор проигрывает нечеткому в качестве по времени переходного процесса ($t_{\text{FUZZY}} \approx 3,1$ с, $t_{\text{NEURO}} \approx 6,8$ с), в то время как значение перерегулирования в обоих случаях снизилось до $\sigma \approx 2\%$ по сравнению со стандартным значением $\sigma_{\text{CLASSIC}} \approx 7\%$.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о целесообразности применения элементов искусственного интеллекта в САУ по каналу крена летательного аппарата. Несмотря на то, что в данном исследовании наилучшее качество переходного процесса обеспечивается нечетким регулятором, применение нейросетевого регулятора во многих случаях может быть более оправданным. Нечеткий регулятор сложнее в настройке и требует дополнительных процедур, направленных на получение свойства адаптивности, в то время как настройка адаптивного нейросетевого регулятора гораздо легче и занимает меньше времени. Перечисленные факторы делают нейросетевой регулятор более применимым на практике, по сравнению с нечетким, в условиях дефицита времени как на настройку регулятора, так и на разработку всей системы управления в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кулида Е. Л., Лебедев В. Г. Перспективы использования методов искусственного интеллекта в авиации // Управление развитием крупномасштабных систем: Труды 13-й Междунар. конф. (М., 28–30 сент. 2020 г.). М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2020. С. 1535–1541. EDN: OIJOYG.
2. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта. М: НИЦ ИНФРА-М, 2021. 530 с.

3. Шилоносков А. В., Молдован Д. В. Динамическая коррекция управляющих воздействий системы управления сложного технического объекта с использованием нейросетевых технологий // Альманах Перм. военного ин-та войск нац. гвардии. 2021. № 4(4). С. 415–422. EDN: SYZWBS.
4. Андриевская Н. В., Билоус О. А., Семенов С. С. Методика проектирования нечеткого регулятора на базе ПИ-регулятора в среде Matlab // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Электротехника, информ. технологии, системы управления. 2012. № 6. С. 282–287.
5. Богачев И. С., Коломыцев В. Г. Методика настройки нечеткого регулятора с нелинейной характеристикой Р-типа средствами Matlab // Соврем. наукоемкие технол. 2020. № 11-1. С. 9–14. Doi: 10.17513/snt.38330. EDN: VGDEWH.
6. Иванов М. Е., Езерский В. В., Беляков А. А. Сравнительный анализ классической и интеллектуальной систем автоматического управления углом крена низколетящего аппарата // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 61–67. Doi: 10.31799/2949-0693-2023-4-61-67.

REFERENCES

1. Kulida E. L., Lebedev V. G. Prospects for the use of artificial intelligence methods in aviation. Proc. 13th Intern. Conf. Managing the development of large-scale systems. Moscow; 2020, pp. 1535–1541. (In Russ.). EDN: OIJOYG.
2. Andreychikov A. V., Andreychikova O. N. Intelligent information systems and methods of artificial intelligence. Moscow: SIC INFRA-M; 2021. 530 p. (In Russ.).
3. Shilonosov A. V., Moldovan D. V. Dynamic correction of control actions of the control system of a complex technical object using neural network technologies. Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard. 2021;(4):415–422. (In Russ.). EDN: SYZWBS.
4. Andrievskaya N. V., Bilous O. A., Semenov S. V. Methodology for designing a fuzzy controller based on a PI controller in MATLAB. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. 2012;(6):282–287. EDN: PWNZBX.
5. Bogachev I. S., Kolomytsev V. G. Technique for adjusting a fuzzy regulator with a nonlinear P-type characteristic by Matlab. Modern high-tech technologies. 2020;(11-1):9–14. Doi: 10.17513/snt.38330. EDN: VGDEWH.
6. Ivanov M. E., Ezerskiy V. V., Belyakov A. A. Comparative analysis of classical and intelligent systems of automatic roll angle control of a low-flying vehicle. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(4):61–67. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2023-4-61-67.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Михаил Евгеньевич, ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – космонавтика, моделирование аэрокосмических систем управления, методы искусственного интеллекта.

Езерский Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – космические средства и воздействия космотехногенной среды на космические аппараты, системы ориентации и управления космическими аппаратами.

Поступила в редакцию 26.08.2024

Поступила после рецензирования 29.08.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Ivanov Mikhail E., Assistant at the Department of Operation and Control in Aerospace Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – astronautics, modeling of aerospace control systems, artificial intelligence methods.

Ezerskiy Vladimir V., D. Sc. in Technical Sciences, Professor at the Department of Operation and Control in Aerospace Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – space facilities and the effects of the cosmotechnogenic environment on spacecraft, spacecraft orientation and control systems.

Received 26.08.2024

Revised 29.08.2024

Accepted 10.10.2024

Использование компьютерного зрения для верификации движения экструдера 3D-принтера

Денис Викторович Григорьев¹

DenisGrigoriev04@ya.ru

Сергей Геннадьевич Бабчинецкий¹

✉ lnpt@guap.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследована возможность использования компьютерного зрения для верификации движения экструдера. Проверены подходы нахождения экструдера по цвету с помощью цветного маркера и вычитания фона на основе определения движения. Второй подход оказался неуспешным. Первый подход оказался достаточно точным ($RMSE=1,163$). Показана возможность использования компьютерного зрения для контроля работы 3D-принтеров открытой конструкции.

Ключевые слова: детекция объектов, трекинг объектов, компьютерное зрение

Для цитирования: Григорьев Д. В., Бабчинецкий С. Г. Использование компьютерного зрения для верификации движения экструдера 3D-принтера // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 65–70. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-65-70.

Original article

Using computer vision to verify the movement of a 3D printer extruder

Denis V. Grigoriev¹

DenisGrigoriev04@ya.ru

Sergey G. Babchinetsky¹

✉ lnpt@guap.ru

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This problem explores the possibility of using computer vision to verify the movement of an extruder. Approaches to finding the extruder by color using a color marker and by background subtraction based on motion detection were tested. The second approach was not successful. The first approach turned out to be quite accurate ($RMSE=1.163$). The study shows the possibility of using computer vision to monitor the operation of open-design 3D printers.

Keywords: object detection, object tracking, computer vision

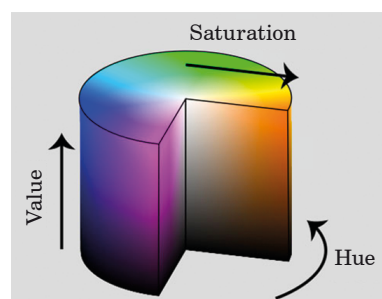
For citation: Grigoriev D. V., Babchinetsky S. G. Using computer vision to verify the movement of a 3D printer extruder. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):65–70. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-65-70.

Введение

Цветовая модель HSV (от англ. «Hue», «Saturation», «Value») представляет собой альтернативное представление цвета, которое основано на восприятии цвета человеческим глазом. Она позволяет легко работать с цветами, особенно при изменении их яркости или насыщенности без изменения оттенка [1].

Основные компоненты модели HSV включают в себя (рис. 1):

1) оттенок (Hue) – параметр, который определяет цветовой тон. Он представлен в виде угла на цветовом круге, где каждый угол соответствует определенному цвету;



- Рис. 1. Цветовая модель HSV
- Fig. 1. HSV color model

2) насыщенность (Saturation) – параметр, который определяет, насколько цвет является «чи-

стым» по сравнению с оттенком серого. Более высокие значения насыщенности соответствуют более ярким и насыщенным цветам, тогда как низкие значения приводят к более блеклым цветам;

3) значение (Value) – параметр, который определяет яркость цвета. Он указывает, насколько светлым или темным является цвет. Значение «0» соответствует черному цвету, а значение «1», или «100 %», – белому.

В компьютерном зрении модель HSV используется для различных задач, включая сегментацию изображений, распознавание объектов, а также анализ и визуализацию данных. Например, при сегментации изображений можно использовать значения оттенка для выделения определенных объектов или областей на изображении, а значения насыщенности и значения – для их дополнительной характеристики или фильтрации [2].

Среднеквадратичная ошибка. MSE, или Mean Squared Error (среднеквадратичная ошибка), является одной из основных метрик в оценке качества моделей в машинном обучении и статистике (1). Она широко применяется во многих областях, включая регрессионный анализ, обработку сигналов, компьютерное зрение, исследования операций и т. д. MSE представляет собой среднее значение квадратов разностей между фактическими и предсказанными значениями:

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^n (Y_i - y_i)^2}{N}, \quad (1)$$

где N – количество всех элементов; Y_i – истинное значение i -го признака; y_i – предсказанное моделью значение i -го признака.

Использование MSE имеет ряд преимуществ. Во-первых, она измеряет среднеквадратичную разницу между фактическими и предсказанными значениями, что позволяет оценить степень ошибки модели в каждой точке данных. Это дает возможность лучше понять, насколько модель хорошо предсказывает целевую переменную.

MSE плохо интерпретируется, поэтому в качестве метрики лучше использовать RMSE, или Root Mean Squared Error (корень среднеквадратичной ошибки), измеряющуюся в таких же единицах, что и данные значения:

$$RMSE = \sqrt{MSE}. \quad (2)$$

Библиотека для компьютерного зрения OpenCV (Open Source Computer Vision Library)

является мощным инструментом компьютерного зрения, который широко используется разработчиками и исследователями в области обработки изображений и анализа видео [3].

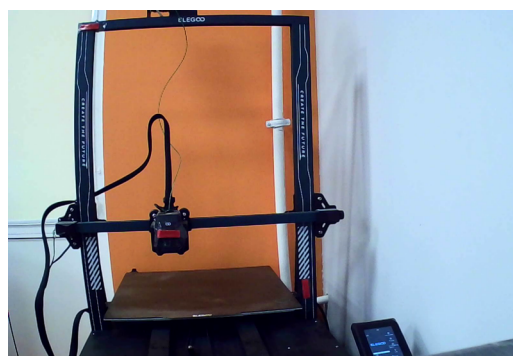
С помощью OpenCV в Python можно выполнять широкий спектр задач, включая обнаружение объектов изображениях и видео, выделение определенных областей или объектов, измерение и анализ характеристик объектов на изображениях, определение движущихся объектов, создание и обработка видеопотоков – запись, чтение и изменение свойств видеофайлов, а также работу с видеорекамерами [4].

Материал и методы исследования

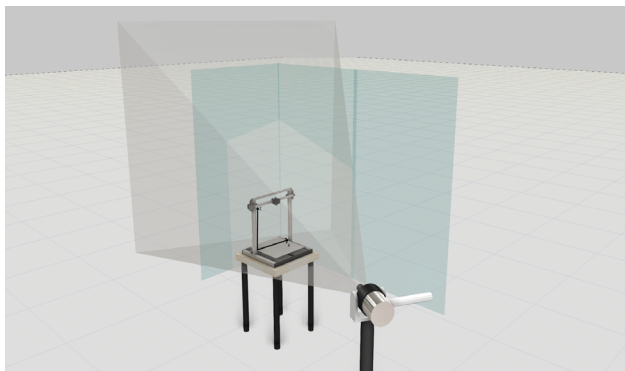
Для исследования использовали 3D-принтер Elegoo Neptune 3 Max, который отличается большими размерами рабочей области – 420×420×500 мм, открытой конструкцией и движением экструдера по осям OX и OZ, движение по оси OY осуществляется передвижением столика. Поэтому движение экструдера происходит в плоскости, перпендикулярной горизонту [5].

Для отслеживания экструдера на него был наклеен ярко-красный маркер, цвет был выбран таким образом, чтобы он был наиболее заметен на корпусе принтера, цвет которого имеет в основе темно-зеленый и белые цвета [6]. Напротив принтера была помещена камера, таким образом, чтобы в нее попала вся рабочая область (рис. 2; 3). Было исследовано влияние фокусного расстояния, разрешения, калибровки камеры.

Изображение с видеорекамеры имело различные искажения; чтобы убрать часть из них, была проведена процедура калибровки камеры. Распечатанная калибровочная доска была помещена в центр камеры, углы ее обзора и другие



- Рис. 2. Кадр записи 3D-принтера ELEGO с наклеенным на него маркером
- Fig. 2. Recording frame of an ELEGO 3D printer with a marker glued to it

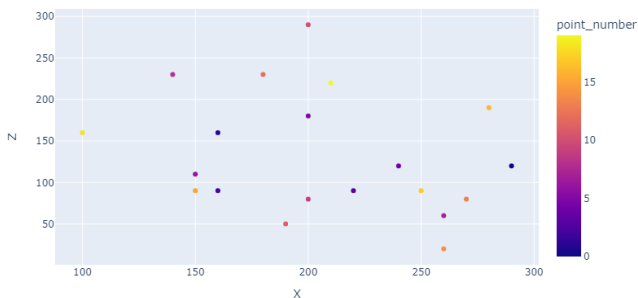


• Рис. 3. Положение камеры
• Fig. 3. Camera position

положения. Полученные 14 изображений с калибровочной доской были проанализированы с помощью библиотеки OpenCV с целью получить параметры для исправления искажений этой камеры [6].

Чтобы получить видео движения экструдера, была создана программа для него на G-Code. В начале файла были использованы команды **G28 Y0 X0 Z0** (установка экструдера в начальные координаты) и **G90** (переход в абсолютную систему координат). Для приведения в движение экструдера используется команда **G0 X[X-координата] Y0 Z[Z-координата]** с помощью **G4 P500**, после каждой команды движения была сделана пауза в полсекунды. В конце файла была использована команда **G28 Y0 X0 Z0**. Таким образом был создан файл G-Code с семью случайными точками в рабочей области принтера в плоскости, где $Y=0$ (рис. 4). Файл был открыт, проанализирован и повторно сохранен в программе Cura во избежание ошибок. Было снято видео работы принтера.

Далее с помощью цикла были проанализированы первые кадры видео, каждый кадр подвергся корректировке искажений, созданных камерой, изображение было преобразовано под HSV-цветовую модель. Сначала были выбраны



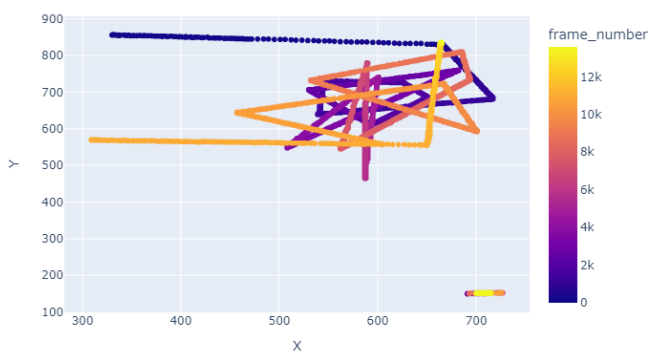
• Рис. 4. Точки, в которые должен был быть перемещен экструдер
• Fig. 4. Points where the extruder had to be moved

максимальное и минимальные значения типа `unit8`, используемые в OpenCV – $(0, 0, 0)$ и $(255, 255, 255)$. Те пиксели, которые были вне этого диапазона, окрашивались в черный цвет – $(0, 0, 0)$ [7]. Были подобраны такие значения, чтобы был заметен только маркер, но на всех кадрах, поскольку красный находится в конце шкалы H , двигалась только нижняя граница, были выбраны границы $(150, 0, 0)$ и $(255, 255, 255)$ [8].

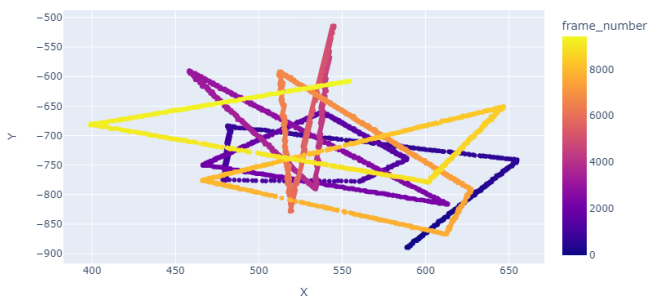
Было замечено, что после изменения фокусного расстояния маркеры перестали сильно выделяться, были откорректированы SV-составляющие до $(150, 50, 50)$ и $(255, 255, 255)$.

Во время анализа всего видео был проведен поиск внешних контуров маркера с преобразованием его в крайние точки, чтобы определить экстремумы X и Y контура. Был выбран контур с максимальной площадью. По среднему значению границ контура были найдены координаты экструдера в системе координат изображения (рис. 5).

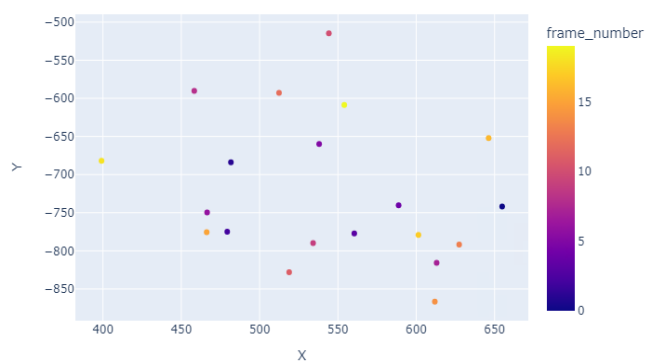
Сначала для точек были изменены оси, и осуществлен поворот на 270 и -5° , были удалены



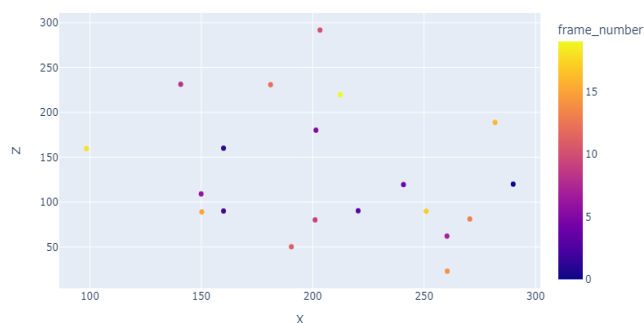
• Рис. 5. Необработанный массив точек (в системе координат изображения)
• Fig. 5. Unprocessed array of points (in image coordinate system)



• Рис. 6. Изображение после удаления начальных и конечных движений принтера, смены осей, поворота и удаления выбросов
• Fig. 6. After removing the printer's start and end movements, changing axes, rotating and removing outliers



• *Рис. 7. Изображение после усреднения и фильтрации точек*
 • *Fig. 7. After averaging and filtering points*



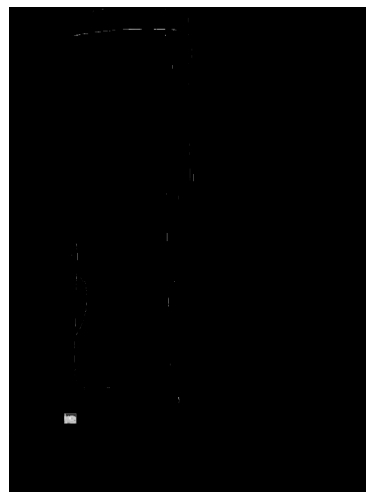
• *Рис. 8. Изображение после операций с системой координат*
 • *Fig. 8. After coordinate system operations*

точки, находящиеся за пределами рабочей области, и точки, возникшие в начале и конце работы принтера из-за перемещения экструдера в начальное положение (рис. 6).

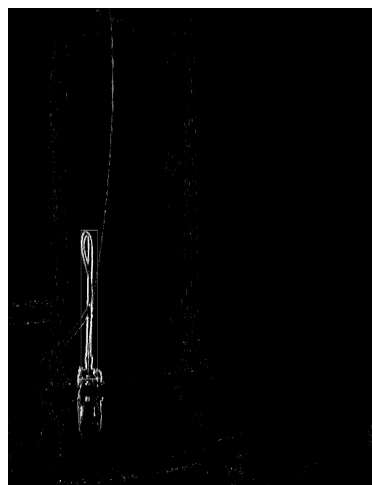
Затем были пересчитаны координаты точек на скользящее среднее с окном 17. Потом с помощью скалярного произведения были удалены точки, которые со своими соседями образуют угол менее 35° . Также были удалены точки, чей MSE с предыдущей точкой был меньше 1. Удалена точка, в которой экструдер находился в начальный момент времени (рис. 7).

Для дальнейшего преобразования системы координат под систему координат принтера были использованы три первые точки, 1000 раз все точки сдвигались на разность полученных средних между первыми тремя точками, с помощью метода наименьших квадратов находилась матрица, которая умножалась на все точки (рис. 8).

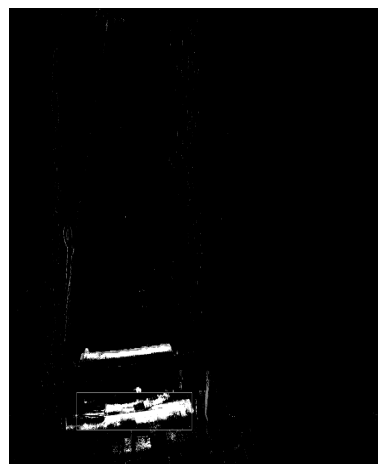
Были предприняты попытки отказаться от использования цветного маркера и находить ТСР экструдера за счет вычитания фона на основе определения движения (Background Subtractor MOG2).



• *Рис. 9. Кадр видео после фильтрации по цвету*
 • *Fig. 9. Video frame after color filtering*



• *Рис. 10. Попытка использовать вычитание фона*
 • *Fig. 10. Trying to use background subtraction*



• *Рис. 11. Попытка использовать вычитание фона (двигался столик)*
 • *Fig. 11. Attempting to use background subtraction (the table was moving)*

Результаты исследования и их обсуждение

При помощи обнаружения цветного маркера были успешно получены точки, в которые должен был переместиться экструдер. RMSE составило 1,163; отдельно по осям Ox и Oz – 1,225 и 1,098 соответственно. Без использования метода наименьших квадратов за счет одного смещения $RMSE = 19,869$, отдельно по осям Ox и Oz – 17,807 и 21,735 соответственно.

Метода наименьших квадратов достаточно для исправления искажений, однако калибровка камеры упростила подбор параметров для обработки точек, применение перспективного искажения не улучшило ситуацию [9].

Метод с вычитанием фона оказался неуспешным, несмотря на преобразования, вывод алгоритма Background Subtractor MOG2 был слишком непредсказуемым: в какие-то моменты времени был полностью виден экструдер, в другие – только отдельные его отчасти, появление посторонних движений в кадре на некоторое время в один цвет (рис. 9–11).

Заключение

Использование данного метода ограничивается возможностью использования цветных маркеров и точной установкой видеокамеры. Процесс трансформации траектории движения экструдера в наборы точек и итоговых координат представляет собой крайне нетривиальную задачу.

Из-за расположения камеры, ее характеристик и неточной калибровки изображение было подвергнуто сильным искажениям, но координаты точек удалось восстановить, что говорит о возможности использования метода в более сложных условиях.

Несмотря на перечисленные ограничения, метод характеризуется невысокими потребностями в вычислительных ресурсах и обеспечивает полную интерпретируемость результатов его применения. Важно отметить, что эти особенности делают его полезным для практического использования в различных областях – в частности, проводить анализ и коррекцию работы принтера с целью устранения неполадок, связанных с некорректным перемещением экструдера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основы моделей цвета HSV и HSL в компьютерной графике: определения, свойства и применение // Науч. статьи.Ру – портал для студентов и аспирантов. URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/modeli-hsv-i-hsl/> (дата обращения: 10.06.2024).
2. Солям Я. Э. Программирование компьютерного зрения на языке Python / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2016. 312 с.: ил.
3. Обнаружение движущихся объектов с помощью OpenCV с использованием обнаружения контуров и вычитания фона // Хабр. URL: <https://habr.com/ru/articles/786436/> (дата обращения: 10.06.2024).
4. Welcome to Python.org. URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 10.06.2024).
5. G-code – RepRap. URL: <https://reprap.org/wiki/G-code> (дата обращения: 10.06.2024).
6. GCODE: основы. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/xedos/gcode-the-basics> (дата обращения: 10.06.2024).
7. OpenCV – Open computer vision library. URL: <https://opencv.org/> (дата обращения: 10.06.2024).
8. ELEGOO: Best consumer level 3D printers, materials and STEM products – ELEGOO official. URL: <https://elegoo.com/> (дата обращения: 10.06.2024).
9. Обработка изображений с помощью OpenCV / Г. Б. Гарсия [и др.]; пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2016. 210 с.: ил.

REFERENCES

1. Basics of HSV and HSL color models in computer graphics: definitions, properties and application. Scientific Articles. Ru – a portal for students and graduate students. Available from: <https://nauchniestati.ru/spravka/modeli-hsv-i-hsl/> [Accessed 10 June 2024].
2. Solem J. E. Computer vision programming in Python; trans. from English by A. A. Slinkin. Moscow: DMK Press; 2016. 312 p. (In Russ.).
3. Detecting moving objects with OpenCV using edge detection and background subtraction. Sudo Null IT News Available from: <https://habr.com/ru/articles/786436/> [Accessed 10 June 2024].
4. Welcome to Python.org. Available from: <https://www.python.org/> [Accessed 10 June 2024].
5. G-code – RepRap. Available from: <https://reprap.org/wiki/G-code> [Accessed 10 June 2024].

6. GCODE: basics. Available from: <https://3dtoday.ru/blogs/xedos/gcode-the-basics> [Accessed 10 June 2024].
7. OpenCV – Open computer vision library. Available from: <https://opencv.org/> [Accessed 10 June 2024].
8. ELEGOO: Best consumer level 3D printers, materials and STEM products – ELEGOO official. Available from: <https://elegoo.com/> [Accessed 10 June 2024].
9. Garcia G. B., Suarez O. D., Aranda J. L. E., Tercero J. S., Gracia I. S., Enano N. V. Image processing with OpenCV; trans. from English by A. A. Slinkin. Moscow: DMK Press; 2016. 210 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Григорьев Денис Викторович, студент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – компьютерное зрение.

Бабчинецкий Сергей Геннадьевич, аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, машинное обучение.

Поступила в редакцию 16.04.2024

Поступила после рецензирования 13.05.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Grigoriev Denis V., Student at the Department of Higher Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – computer vision.

Babchinetsky Sergey G., Postgraduate Student at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – include mathematical modeling, machine learning.

Received 16.04.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 10.10.2024

Датчик на основе интерферометра Маха – Цандера

Александр Федотович Крячко¹

✉ alex_k34.ru@mail.ru, SPIN-код: 2567-9775

Олег Васильевич Шакин¹

oshakin@mail.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Для решения задачи контроля напряженно-деформированного состояния технических объектов применяются методы измерения, основными из которых являются механические, тензометрические и пьезоэлектрические. Рассмотрены теоретические и практические подходы к построению функциональных схем волоконно-оптических измерительных преобразователей механических величин на базе интерферометра на полимерном оптическом волокне. Рассмотренный метод основан на прямом корреляционном сравнении распределений интенсивности опорного и текущего спекл-изображений, что позволяет проводить автоматизированный контроль параметров деформации технических объектов.

Ключевые слова: датчик, интерферометр Маха – Цандера, полимерное оптоволокно, спекл-изображение

Для цитирования: Крячко А. Ф., Шакин О. В. Датчик на основе интерферометра Маха – Цандера // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 71–75. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-71-75.

Original article

Sensor on the basis of the Mach – Zehnder interferometer

Alexander F. Kryachko¹

✉ alex_k34.ru@mail.ru, SPIN-code: 2567-9775

Oleg V. Shakin¹

oshakin@mail.ru

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. To solve the problem of controlling the stress-strain state of technical objects, measurement methods are used, the main ones being mechanical, strain gauge and piezoelectric methods. Theoretical and practical approaches to the construction of functional schemes of fibre-optic measuring transducers of mechanical quantities on the basis of an interferometer on a polymer optical fibre are considered. The considered method of signal processing of interferometer on polymer optical fibre is based on direct correlation comparison of intensity distributions of reference and current speckle-images, which allows to carry out automated control of deformation parameters of technical objects.

Keywords: sensor, Mach – Zehnder interferometer, polymer optical fibre, speckle imaging

For citation: Kryachko A. F., Shakin O. V. Sensor on the basis of the Mach – Zehnder interferometer. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(5):71–75. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-71-75.

В последние годы наблюдается повышение интереса к использованию полимерных оптических волокон (ПОВ) в качестве чувствительных элементов датчиков и преобразователей физических величин [1]. Это обусловлено тем, что ПОВ обладают значительными преимуществами перед традиционными кварцевыми оптическими волокнами (КОВ) при использовании в датчиках, которые включают в себя большую числовую апертуру, малую массу, больший предел упругой деформации, механическую прочность, высокую эластичность при деформации и изгибах волокна, а также высокую чувствительность к деформационным воздействиям.

В работе [2] сообщается, что датчики на полимерных волокнах позволяют обеспечить более высокую чувствительность к деформации, чем на кварцевых оптических волокнах. Это происходит за счет лучшего согласования механического сопротивления полимерных волокон с другими материалами и гораздо более низкого модуля Юнга. В соответствии с этим, авторы [2] отмечают, что современные волоконно-оптические сенсоры и преобразователи деформации должны изготавливаться на базе полимерных волокон. Современные полимерные оптические волокна на основе полиметилметакрилата (ПММА) доступны для одномодового режима с диаметром сердцевины около

10 мкм, что соответствует диаметру традиционных кварцевых одномодовых волокон. Однако недостатком волокон на основе ПММА является большее затухание сигнала на длинах волн, соответствующих ближней инфракрасной (ИК) области спектра. Для преодоления этого недостатка можно применить два подхода. Первый заключается в изменении длины волны детектирования до видимого диапазона, где затухание ПММА волокон намного меньше. Другой возможностью является использование так называемых перфторированных ПОВ, где атомы водорода в полимере обмениваются атомами фтора, которые смещают полосу поглощения материала. Затухание такого перфторированного ПОВ в ближней ИК-области спектра намного меньше по сравнению с обычными полимерными волокнами.

В отличие от кварцевых оптических волокон, большинство ПОВ являются в общем многомодовыми волокнами, которые имеют большой диаметр сердцевины и способны распространять большое количество мод, которые взаимодействуют между собой. На протяжении последних десяти лет во многих исследовательских целях были использованы также одномодовые и микроструктурированные ПОВ [3]. В частности, последние достижения в технологии изготовления одномодовых ПОВ позволили существенно расширить их использование для интерференционных измерений [2]. Благодаря большому диаметру сердцевины ПОВ являются более простыми в механической обработке и при соединении волокон, поэтому датчики на основе многомодовых ПОВ позиционируются как более дешевые и простые в эксплуатации по сравнению с аналогичными датчиками на кварцевых волокнах [4]. Преимущество низкой стоимости стало весомым фактором для исследования свойств ПОВ и подталкивает движение технологий детектирования к исследованию потенциально дешевых датчиков интенсивности, которые используют многомодовые ПОВ [5].

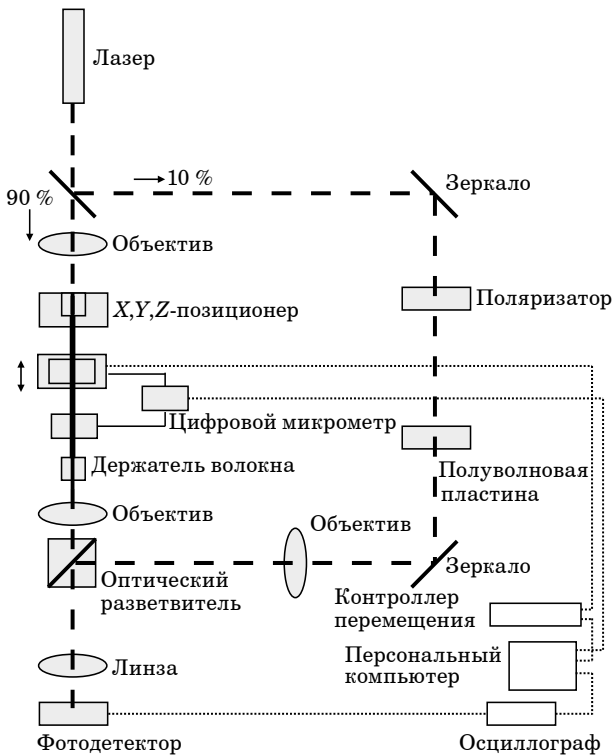
При использовании ПОВ для измерения деформации основными преимуществами полимерных сенсорных материалов являются их пластичность и высокие пределы упругой деформации. ПОВ, естественно, обладают большим пределом упругой деформации, что потенциально обеспечивает максимальный диапазон деформации около 6–12 %, по сравнению с 1–3 % для кварцевого волокна [6]. Также одним из основных преимуществ ПОВ является малый модуль Юнга, значение которого для типичных ПОВ значительно меньше, чем у кварцевых оптических волокон, что создает предпосылки для их применения в датчиках деформации [7].

Менее известными преимуществами ПОВ являются их высокая чувствительность к деформации (коэффициент оптической чувствительности к деформации) и отрицательный термооптический коэффициент. В работе [2] проведены измерения фазовой чувствительности одномодового ПОВ к деформации и температурным изменениям. Для исследований был использован ПОВ с диаметром оболочки из ПММА размером 125 мкм и диаметром сердцевины 6 мкм на основе ПММА/ПС. Измерения проводились с помощью интерферометра Маха – Цандера, и интерференция наблюдалась между излучением, которое прошло через исследуемое волокно, и излучением, прошедшим через второе плечо интерферометра. В процессе измерения деформации осуществлялся контроль напряжения, приложенного к волокну, что позволяет рассчитать модуль Юнга. Полученное среднее значение при измерении фазовой чувствительности к деформации $d\Phi/dL$ составляло $(131 \pm 3) \cdot 10^5$ рад/м при длине волны $\lambda = 632,8$ нм. Фазовая чувствительность к изменению температуры волокна $d\Phi/dT$ составила (212 ± 26) рад/(м·К).

Наиболее распространенной схемой волоконно-оптических датчиков интерференционного типа на основе ПОВ является схема интерферометра Маха – Цандера. В работе [8] представлена конфигурация волоконно-оптического интерферометра Маха – Цандера (рис. 1) при использовании одномодового волокна на основе ПММА с диаметром сердцевины 3,4 мкм легированной полистиролом ($n = 1,4954$) и диаметром оболочки 125 мкм ($n = 1,4906$). Такая схема позволяет измерять изменение фазы световой волны, распространяющейся в волокне, в зависимости от величины приложенного напряжения. Чувствительность интерферометра к изменению фазы при напряжении волокна составляла $1,39 \cdot 10^7$ рад/м в диапазоне напряжений до 15,8 %. В дальнейших исследованиях [9] для такой схемы датчика были откалиброваны линейный и нелинейный фазовые отклики к приложенному напряжению. Откалиброванные значения фазовой чувствительности для линейного и нелинейного отклика составляли $1,37 \cdot 10^7$ и $3,1 \cdot 10^6$ рад/м соответственно.

Для обеспечения функционирования датчика деформации на основе ПОВ схема интерферометра Маха – Цандера, изображенная на рис. 1, была несколько модифицирована [10], что позволило автоматизировать процесс измерения изменения фазы излучения.

Подобный принцип был применен для построения ультразвукового датчика интерференционного типа на основе одномодового ПОВ



• Рис. 1. Датчик деформации на основе интерферометра Маха – Цандера
 • Fig. 1. Strain sensor based on a Mach – Zehnder interferometer

[11]. Сдвиг фазы, вызванный ультразвуковой волной, которую излучал откалиброванный пьезоэлектрический преобразователь на чувствительный участок волокна, погруженный в воду, был измерен с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха – Цандера. Чувствительность такого датчика на основе ПОВ к обнаружению ультразвуковых волн оказалась более чем на один порядок выше, по сравнению с аналогичной схемой на основе кварцевого волокна. В продолжение исследований в этом направлении в качестве чувствительного элемента датчика ультразвуковых волн было использовано микроструктурированное ПОВ на основе ПММА с внешним диаметром 125 мкм [12]. Исследования чувствительности датчика к воздействию ультразвуковых колебаний проводились в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц. Сравнение чувствительности микроструктурированных ПОВ с результатами, полученными для различных типов волокон, показали, что датчики на основе микроструктурированных ПОВ обладают большей чувствительностью по сравнению с датчиками на кварцевых волокнах и позволяют создавать измерительные схемы со значительно более низким уровнем шумов, чем при использовании многомодовых ПОВ.

Пространственное распределение интенсивности спекл-структуры, сформированной многомодовым оптическим волокном, вдоль оси Oz в любой точке с координатами (r, θ) можно выразить через соотношение [13]:

$$I(r, \theta) = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^M A_m A_l J_{n_m} \times \cos(n_m \theta) J_{n_l}(n_l \theta) \exp[-i(\Delta\beta_{ml})z - (\Delta\phi_{ml})], \quad (1)$$

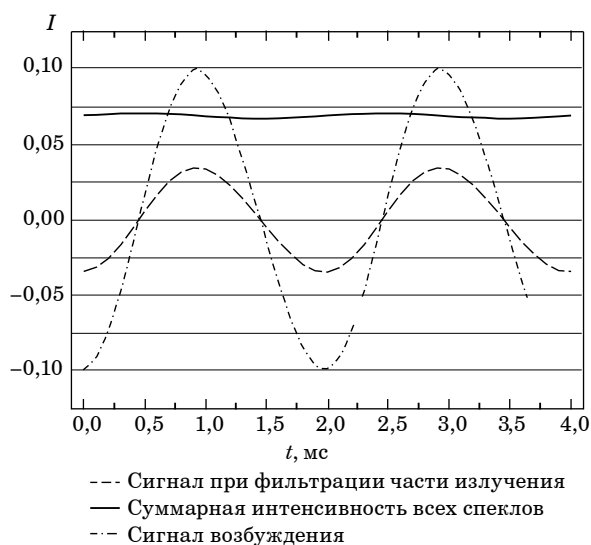
где M – количество мод, распространяющихся в волокне; m и l – индексы для каждой волноводной моды; A_m и A_l – соответствующие значения амплитуды для каждой моды; параметр $Y = n_l \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$ представляет собой характеристическую проводимость сердцевины волокна; $\Delta\beta_{ml}$ представляет собой разницу постоянных распространения для мод m и l ; $\Delta\phi_{ml}$ – разница фаз между модами m и l ; J_{n_m} является функцией Бесселя, порядок которой определяется фазовым параметром моды в сердцевине волокна $U_m = a \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta_m^2}$, где a – радиус сердцевины волокна; k – волновое число.

При внешних возмущениях многомодового волокна происходит модуляция распределения интенсивности излучения в спекл-картине за счет эффекта взаимодействия между волноводными модами и их фазовой модуляции. Для аналитического описания данного процесса можно предположить, что изменение пространственного распределения интенсивности спекл-картины осуществляется исключительно за счет возмущения участка волокна длиной L . Выражение для нахождения интенсивности любого отдельного спекла может быть получено путем интегрирования функции пространственной интенсивности по размеру i -го спекла:

$$I_i = \int_{a_i} I da_i = \frac{1}{2} \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M A_m^2 J_{n_m}^2 \cos^2(n_m \theta) + \int_{a_i} da_i Y \sum_{m=1}^M \sum_{l=m+1}^M A_m A_l J_{n_m} \cos(n_m \theta) J_{n_l} \cos(n_l \theta) \times [\cos(\Delta\beta_{ml}z - \Delta\phi_{ml}) - \sin(\Delta\beta_{ml}z - \Delta\phi_{ml}) \gamma_{ml} F(t)], \quad (2)$$

где $\gamma_{ml} F(t)$ – величина возмущения; $F(t)$ – внешнее возбуждение.

Результаты компьютерного моделирования, которые дают возможность спрогнозировать выходной сигнал чувствительного элемента на основе многомодового волокна, изображены на рис. 2.



- *Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования*
- *Fig. 2. Results of computer modelling*

Полученный выходной сигнал представлен на той же частоте, что и опорный сигнал, который представляет возмущение волокна гармониче-

ским сигналом. В случае регистрации фотоприемником всей спекл-картины модулированный выходной сигнал остается практически неизменным.

Таким образом, рассмотрены основные физические свойства спекл-структур, которые формируются на выходе многомодовых оптических волокон в результате межмодовой интерференции с точки зрения их метрологического применения, и установлены основные принципы и оптимальные условия регистрации образованных спекл-структур при использовании современных цифровых видеосенсоров и фотоприемников. Установлена прямая аналитическая связь между значением изменения коэффициента корреляции интенсивностей последовательно полученных спекл-изображений и величиной продольной деформации многомодового полимерного волокна. Полученные результаты позволяют оценить характеристики (динамический диапазон, чувствительность) волоконно-оптического преобразователя деформации в зависимости от параметров полимерного оптоволокна.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Optical sensors based on plastic fibers / L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, R. Nogueira // *Sensors*. 2012. Vol. 12. P. 12184–12207.
2. Strain and temperature sensitivity of a single-mode polymer optical fiber / M. Silva-Lopez [et al.] // *Optics letters*. 2005. Vol. 30, № 23. P. 3129–3131.
3. Cleaved end-face quality of microstructured polymer optical fibres / S. H. Law [et al.] // *Opt. commun.* 2006. T. 265, № 2. P. 513–520.
4. Peters K. Polymer optical fiber sensors – a review // *Smart materials and structures*. 2011. Vol. 20, № 1. P. 338–346.
5. Plastic optical fibre sensors and devices / R. J. Bartlett [et al.] // *Trans. instrum. meas. control*. 2000. Vol. 22. P. 431–457.
6. Large M. C. J., Moran J., Ye L. The role of viscoelastic properties in strain testing using microstructured polymer optical fibres (mPOF) // *Meas. sci. technol.* 2009. Vol. 20, № 3. P. 4014–4020.
7. Peng G. D., Chu P. L. Polymer optical fibre sensing // *Proc. SPIE*. 2002. Vol. 4929. P. 303–311.
8. Large deformation in-fiber polymer optical fiber sensor / S. Kiesel, K. Peters, T. Hassan, M. Kowalsky // *Photonics technology letters. IEEE*. 2008. Vol. 20, is. 6. P. 416–418.
9. Calibration of a single-mode polymer optical fiber large-strain sensor / S. Kiesel, K. Peters, T. Hassan, M. Kowalsky // *Meas. sci. technol.* 2009. Vol. 20, № 3. P. 4016–4023.
10. Validation of a single-mode polymer optical fiber sensor and interrogator for large strain measurements / O. Abdi, K. Peters, M. Kowalsky, T. Hassan // *Meas. sci. technol.* 2001. Vol. 22, № 7. P. 5207–5217.
11. Gallego D., Lamela H. High sensitivity interferometric polymer optical fiber ultrasound sensors for optoacoustic imaging and biomedical application // *Optics letters*. 2009. Vol. 34, № 12. P. 1807–1809.
12. Interferometric microstructured polymer optical fiber ultrasound sensor for optoacoustic endoscopic imaging in biomedical applications / D. Gallego [et al.] // *Proc. SPIE. 23rd International conference on optical fibre sensors*. 2014. Vol. 9157. P. 1–4.
13. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю. Н. Кульчин, О. Б. Витрик, А. А. Камшилин, Р. В. Ромашко. М.: Физматлит, 2009.

REFERENCES

1. Bilro L., Alberto N., Pinto J. L., Nogueira R. Optical sensors based on plastic fibers. *Sensors*. 2012;12:12184–12207.
2. Silva-Lopez M., Fender A., MacPherson W. N., Barton J. S., Jones J. D. C., Zhao D., Dobb H., Webb D. J., Zhang L., Bennion I. Strain and temperature sensitivity of a single-mode polymer optical fiber. *Optics letters*. 2005;30(23):3129–3131.
3. Law S. H., van Eijkelenborg M. A., Barton G. W., Yan C., Lwin R., Gan J. Cleaved end-face quality of microstructured polymer optical fibres. *Opt. commun.* 2006;265(2):513–520.
4. Peters K. Polymer optical fiber sensors – a review. *Smart materials and structures*. 2011;20(1):338–346.
5. Bartlett R. J., Chandy R. P., Eldridge P., Merchant D. F., Morgan R., Scully P. J. Plastic optical fibre sensors and devices. *Trans. instrum. meas. control*. 2000;22:431–457.
6. Large M. C. J., Moran J., Ye L. The role of viscoelastic properties in strain testing using microstructured polymer optical fibres (mPOF). *Meas. sci. technol.* 2009;20(3):4014–4020.
7. Peng G. D., Chu P. L. Polymer optical fibre sensing. *Proc. SPIE*. 2002;4929:303–311.
8. Kiesel S., Peters K., Hassan T., Kowalsky M. Large deformation in-fiber polymer optical fiber sensor. *Photonics technology letters. IEEE*. 2008, vol. 20, is. 6, pp. 416–418.
9. Kiesel S., Peters K., Hassan T., Kowalsky M. Calibration of a single-mode polymer optical fiber large-strain sensor. *Meas. sci. technol.* 2009;20(3):4016–4023.
10. Abdi O., Peters K., Kowalsky M., Hassan T. Validation of a single-mode polymer optical fiber sensor and interrogator for large strain measurements. *Meas. sci. technol.* 2001;22(7):5207–5217.
11. Gallego D., Lamela H. High sensitivity interferometric polymer optical fiber ultrasound sensors for optoacoustic imaging and biomedical application. *Optics letters*. 2009;34(12):1807–1809.
12. Gallego D., Sáez-Rodríguez D., Webb D., Bang O., Lamela H. Interferometric microstructured polymer optical fiber ultrasound sensor for optoacoustic endoscopic imaging in biomedical applications. *Proc. SPIE*. 23rd International conference on optical fibre sensors. 2014, vol. 9157, pp. 1–4.
13. Kulchin Y. N., Vitrik O. B., Kamshilin A. A., Romashko R. V. Adaptive methods of processing of speckle-modulated optical fields. Moscow: Fizmatlit; 2009. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крячко Александр Федотович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – прикладная электродинамика, фотоника, телекоммуникации.

Шакин Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – акустооптика, фотоника, телекоммуникации.

Kryachko Alexander F., D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Head at the Department of Radio Engineering and Optoelectronic Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – applied electrodynamics, photonics, telecommunications.

Shakin Oleg V., D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Means, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – acoustooptics, photonics, telecommunications.

Поступила в редакцию 29.09.2024

Поступила после рецензирования 03.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Received 29.09.2024

Revised 03.10.2024

Accepted 10.10.2024

Моделирование механизмов транспортных соединений с помощью временных сетей Петри

Надежда Юрьевна Чумакова¹

✉ nadezhda.chumakova@guap.ru, orcid.org/0000-0002-8979-979X, SPIN-код: 7883-7126

Анна Алексеевна Мамонтова¹

Mamontovanna@guap.ru, orcid.org/0009-0006-1155-529X, SPIN-код: 2767-4833

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены механизмы открытия и закрытия транспортных соединений протокола СТП-ИСС. Для механизмов построены временные ингибиторные сети Петри, позволяющие моделировать работу механизмов с различными значениями таймеров и задержек. Приведены примеры работы данных механизмов.

Ключевые слова: бортовые сети, протоколы передачи данных, СТП-ИСС, моделирование, сети Петри

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Для цитирования: Чумакова Н. Ю., Мамонтова А. А. Моделирование механизмов транспортных соединений с помощью временных сетей Петри // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 76–86. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-76-86.

Original article

Modeling of transport connection mechanisms using temporal Petri nets

Nadezhda Yu. Chumakova¹

✉ nadezhda.chumakova@guap.ru, orcid.org/0000-0002-8979-979X, SPIN-code: 7883-7126

Anna A. Mamontova¹

Mamontovanna@guap.ru, orcid.org/0009-0006-1155-529X, SPIN-code: 2767-4833

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article considers the STP-ISS protocol mechanisms of opening and closing transport connections. Temporal inhibitory Petri nets are constructed for the mechanisms, allowing to model the operation of mechanisms with different values of timers and delays. Examples of the operation of these mechanisms are presented.

Keywords: on-board networks, communication protocols, STP-ISS, modeling, Petri nets

Acknowledgements. The paper was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant agreement No. FSRF-2023-0003 “Fundamental principles of building of noise-immune systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring”.

For citation: Chumakova N. Yu., Mamontova A. A. Modeling of transport connection mechanisms using temporal Petri nets. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):76–86. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-76-86.

Введение

Сетевое оборудование, используемое в современных бортовых сетях космических аппаратов, передает и обрабатывает большое количество информационных потоков. С увеличением числа устройств в бортовых сетях возрастает не только количество передаваемой информации, но и объем требований и ограничений к сети.

Необходимо, чтобы при передаче информации накладные расходы были минимальны. В протоколе СТП-ИСС [1] – транспортном протоколе,

используемом в сетях SpaceWire [2], – для уменьшения накладных расходов используются транспортные соединения.

Важно, чтобы в оборудовании, работающем в соответствии с протоколом СТП-ИСС, все механизмы транспортных соединений, в особенности механизмы установки и закрытия соединений, были реализованы корректно, в соответствии со спецификацией протокола.

В статье представлены две модели – модель механизма открытия транспортного соединения

и модель механизма закрытия транспортного соединения. Данные модели могут быть использованы для верификации и аттестационного тестирования реализаций механизмов открытия и закрытия транспортных соединений.

В качестве инструмента для моделирования механизмов были выбраны сети Петри [3] – мощный инструмент исследования систем, с помощью которого были построены модели с необходимым уровнем детализации.

Транспортные соединения

Протокол СТП-ИСС – это протокол транспортного уровня, разработанный для применения в сетях SpaceWire. SpaceWire – международный стандарт, описывающий построение бортовых сетей передачи, обработки и управления информацией на борту космических аппаратов [1].

Протокол СТП-ИСС позволяет передавать данные как с установкой транспортного соединения, так и без установки. Важно отметить, что транспортные соединения поддерживают передачу только двух типов данных – срочных и обычных сообщений.

Каждое транспортное соединение является однонаправленным, оно соединяет передатчик и приемник удаленных узлов сети. Один узел может поддерживать до 16 транспортных соединений: по восемь для передатчика и приемника. Для учета активных и неактивных транспортных соединений в протоколе СТП-ИСС используется специальный управляющий блок – «Менеджер транспортных соединений».

Установка транспортного соединения

Установка соединения инициируется приложением, которому необходимо принять или передать большой объем данных.

Узел, являющийся инициатором установки соединения, называется ведущим устройством, а узел, с которым выполняется установка соединения, – ведомым устройством.

Для установки соединения используется трехфазный протокол (рис. 1).

Ведущее устройство отправляет ведомому пакет запроса установки соединения (ЗУС). После этого менеджер транспортных соединений должен взвести таймер T_{con} , в течение которого будет ожидаться пакет подтверждения установки соединения (ПУС) от удаленного узла.

В случае, если пакет ПУС не был получен до момента истечения таймера T_{con} , ведущее устройство должно повторно отправить пакет ЗУС и вновь взвести таймер T_{con} . Если таймер

T_{con} истек три раза и пакет ПУС так и не был получен, то приложение должно быть проинформировано о том, что соединение не установлено (рис. 2).

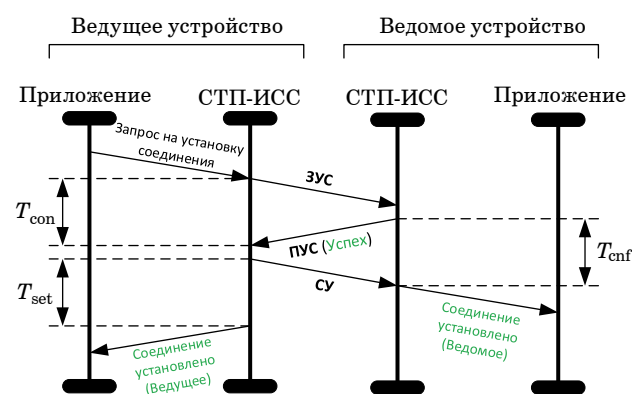
При успешном приеме пакета ЗУС ведомое устройство должно сформировать пакет ПУС. В зависимости от того, может ли быть открыто соединение, поле **Статус соединения** пакета ПУС может принимать значения:

– **Успех**, если соединение может быть установлено;

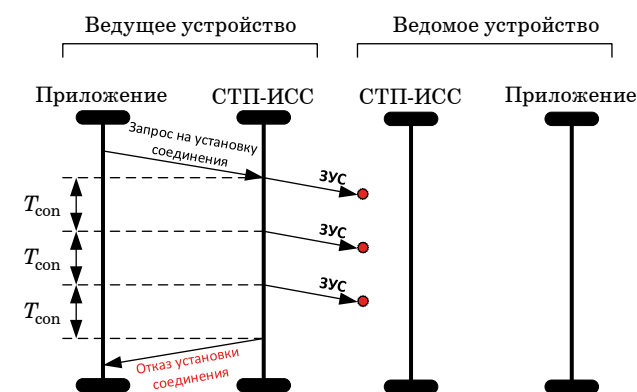
– **Отказ установки соединения**, если соединение не может быть установлено. Отказ может возникнуть по одной из следующих причин: отсутствие свободного пространства в буфере ведомого устройства, отсутствие свободного соединения в ведомом устройстве.

При отправке пакета ПУС с параметром **Успех** на ведомом устройстве должен быть возведен таймер t_{conf} в течение которого будет ожидаться пакет **Соединение установлено (СУ)** от ведущего устройства.

Если пакет ПУС с параметром **Успех** получен ведущим устройством до момента истечения



• Рис. 1. Установка соединения
• Fig. 1. Connection establishment



• Рис. 2. Отказ установки соединения
• Fig. 2. Connection establishment failure

таймера t_{con} , то происходит остановка таймера t_{con} , производится отправка ведомому устройству пакета СУ, а также запуск таймера T_{set} , который отсчитывает время до получения пакета СУ ведомым устройством.

Если пакет СУ получен ведомым устройством до времени истечения таймера T_{cnf} , то ведомое устройство переходит в состояние **Соединение установлено – ведомое**.

Если таймер T_{cnf} истек, а пакет СУ не был получен, то ведомое устройство должно снова отправить пакет ПУС и взвести таймер T_{cnf} . Ведомое устройство должно прекратить повторную отправку пакета ПУС, если таймер t_{cnf} истек три раза – в таком случае соединение закрывается.

Если пакет ПУС с параметром **Успех** получен ведущим устройством в состоянии **Открытие соединения** после отправки пакета СУ и до истечения таймера T_{set} , то производятся следующие действия:

- 1) остановка таймера T_{set} ;
- 2) отправка ведомому устройству пакета СУ;
- 3) запуск таймера установки соединения T_{set} .

В случае, если пакет СУ получен ведомым устройством до времени истечения таймера T_{cnf} , ведомое устройство информирует приложение о том, что соединение установлено.

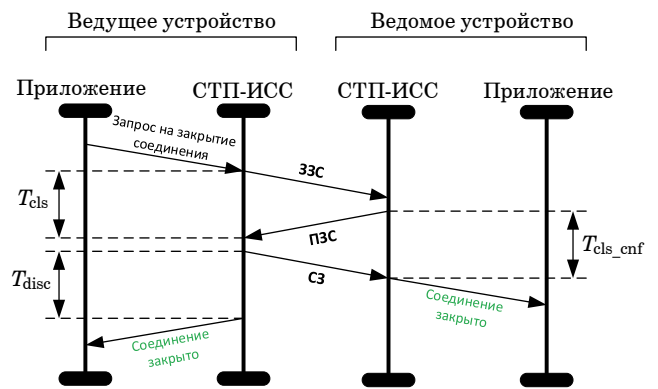
При истечении таймера T_{set} ведомое устройство находится в состоянии **Соединение установлено – ведомое**, а на ведущем устройстве соединение переходит в состояние **Соединение установлено – ведущее**.

Заккрытие транспортного соединения

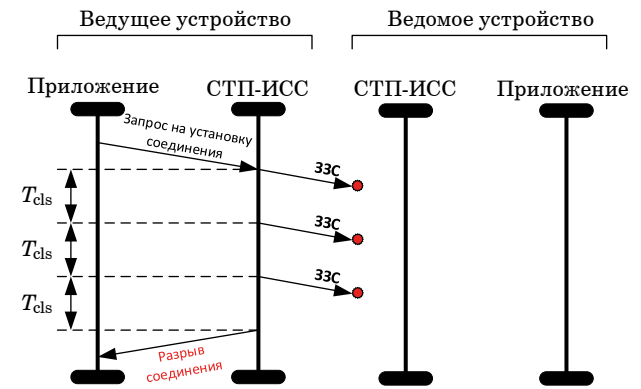
Заккрытие соединения инициируется приложением, которое являлось инициатором открытия транспортного соединения. Узел, являющийся ведомым устройством, не может стать инициатором закрытия соединения.

Для установки соединения, так же, как и для открытия соединения, используется трехфазный протокол (рис. 3).

Для закрытия соединения ведущее устройство формирует пакет запроса закрытия соединения (ЗЗС) и отправляет его ведомому устройству. После этого должен быть возведен таймер закрытия соединения T_{cls} , в течение которого будет ожидаться пакет подтверждения закрытия соединения (ПЗС) от ведомого устройства. В случае, если пакет ПЗС не был получен до истечения таймера T_{cls} , ведущее устройство должно повторно отправить пакет ПЗС и заново взвести соответствующий таймер. Если таймер T_{cls} истек три раза и при этом пакет ПЗС получен не был, соединение должно быть разорвано. Соответствующее транспортное соединение



• Рис. 3. Заккрытие соединения
• Fig. 3. Connection closing



• Рис. 4. Разрыв соединения
• Fig. 4. Connection broken

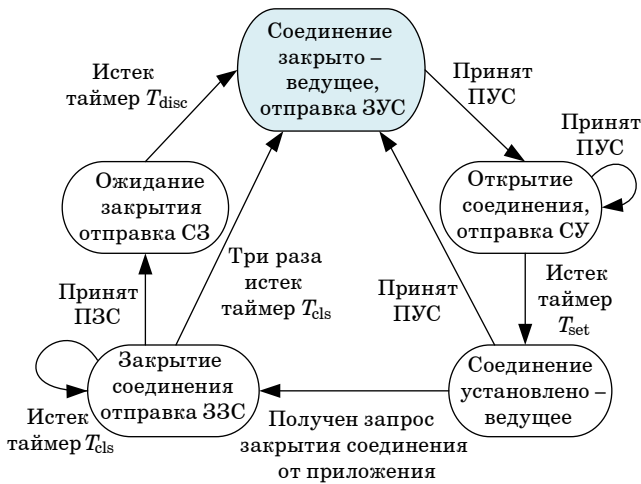
на ведущем устройстве переходит в состояние **Соединение закрыто** (рис. 4).

После отправки пакета ПЗС ведомое устройство возводит таймер T_{cls_cnf} , в течение которого от ведущего устройства ожидается пакет **Соединение закрыто** (СЗ).

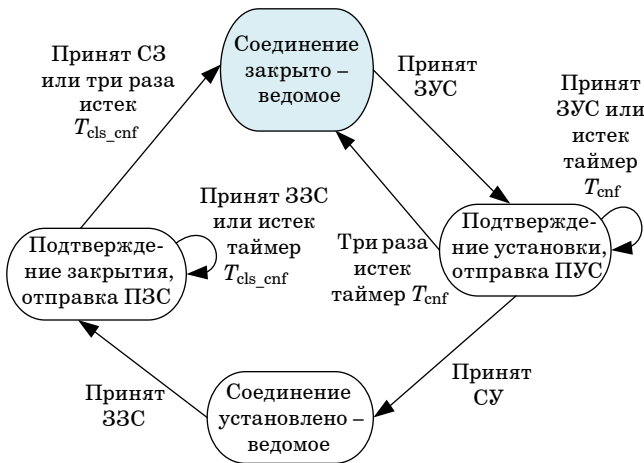
Если пакет ПЗС получен ведущим устройством до времени истечения таймера t_{cls} , то выполняется остановка таймера T_{cls} , затем происходит отправка ведомому устройству пакета СЗ и запуск таймера T_{disc} , который отсчитывает время до момента, когда ведомое устройство примет пакет СЗ. После этого транспортное соединение на ведущем устройстве переходит в состояние **Ожидание закрытия**.

В случае, если пакет ПЗС получен ведущим устройством, находящимся в состоянии **Ожидание закрытия**, и при этом пакет СЗ был отправлен, а таймер T_{disc} не истек, то производится остановка таймера T_{disc} , ведомому устройству отправляется пакет СЗ, и снова запускается таймер T_{disc} .

Если пакет СЗ получен ведомым устройством до времени истечения таймера T_{cls_cnf} , ведомое



• Рис. 5. Машина состояний установки и закрытия транспортного соединения ведущего устройства
 • Fig. 5. State machine of the establishment and closure of the master device transport connection



• Рис. 6. Машина состояний установки и закрытия транспортного соединения ведомого устройства
 • Fig. 6. State machine of the establishment and closure of the slave device transport connection

устройство должно проинформировать приложение о том, что соединение было закрыто.

Если пакет СЗ не был получен, а таймер T_{cls_cnf} истек, то ведомое устройство должно повторно отправить пакет ПЗС и возвести таймер T_{cls_cnf} . В случае, если таймер T_{cls_cnf} истек или был сброшен три раза, а пакет СЗ получен не был, то соединение должно быть разорвано. При этом транспортное соединение на ведомом устройстве переходит в состояние **Соединение закрыто**.

На рис. 5 показана машина состояний установки и закрытия транспортного соединения для ведущего устройства, на рис. 6 – для ведомого.

Сети Петри. Временные и ингибиторные сети Петри

В данном исследовании для моделирования механизмов установки и закрытия транспортных соединений использовались сети Петри.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный мультиграф с двумя типами вершин – позициями (условиями) и переходами (действиями). Формально сеть Петри описывается четверкой $S = (P, T, I, O)$, где $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ – конечное множество позиций; $T = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$ – конечное множество переходов; I – входная функция; O – выходная функция.

Позиции и переходы соединяются ориентированными дугами, причем дуга может соединять только вершины разных типов – позицию и переход. Дуги могут быть направлены как от переходов к позициям, так и наоборот. Допустимо использование кратных дуг – соединения позиции и перехода двумя и более дугами, направленными в одну сторону.

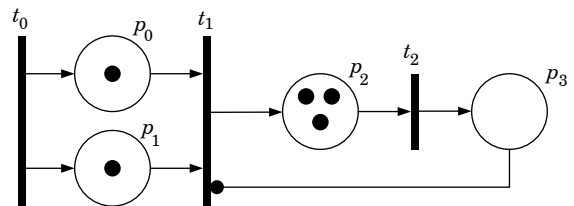
Позициям могут присваиваться фишки, символизирующие различные объекты в сети. Число и положение фишек в сети называется маркировкой. Маркировка может изменяться в процессе работы сети.

Работа сети Петри заключается в запуске ее переходов. Переход разрешен для запуска в случае, если каждая его входная позиция имеет число фишек, большее или равное числу дуг, направленных от данной позиции к данному переходу.

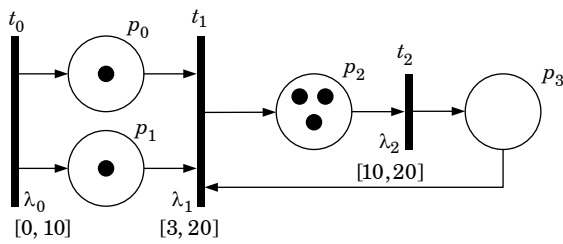
При срабатывании перехода фишки из его входных позиций удаляются (в количестве, равном числу дуг от позиций к переходу) и добавляются к выходным позициям (в количестве, равном числу дуг от перехода к позициям). В один момент времени может сработать только один любой переход из разрешенных [4].

Существует множество подклассов сетей Петри. Для моделирования механизмов установки и закрытия транспортных соединений протокола СТП-ИСС были использованы следующие подклассы сетей Петри:

1) ингибиторные сети Петри (рис. 7). Используются ингибиторные дуги, осуществляющие



• Рис. 7. Ингибиторная сеть Петри
 • Fig. 7. Inhibitor Petri net



• Рис. 8. Временная сеть Петри с жестким временем
 • Fig. 8. Timed Petri net with hard time

проверку на нулевую разметку. В случае, если переход соединен с входной позицией ингибиторной дугой, он может быть запущен только при отсутствии фишек в данной позиции. На графе ингибиторные дуги отображаются в виде дуг с небольшими кругами вместо стрелок (на рис. 7 дуга от позиции p_3 к переходу t_1);

2) временные сети Петри (рис. 8). Переходы ограничены дополнительным временным условием. Существуют различные типы временных сетей Петри: с мягким временем, с жестким временем и другие. Для построения моделей механизмов установки и закрытия транспортных соединений были использованы сети Петри с жестким временем (рис. 8).

В сетях Петри с жестким временем переходы обладают задержкой срабатывания λ , выполняемой после того, как переход станет разрешенным. Помимо задержек, для переходов устанавливается временной интервал, в течение которого переход должен сработать – (α, β) , где α – нижний, а β – верхний предел срабатывания перехода, т. е. минимальное и максимальное время срабатывания перехода после того, как он стал разрешенным [4].

Моделирование механизмов установки и закрытия транспортного соединения

Сеть Петри для механизма установки транспортного соединения

Для моделирования работы механизма установки транспортного соединения протокола СТП-ИСС-14 построена временная ингибиторная сеть Петри (рис. 9).

В представленной сети Петри задержка срабатывания переходов составляет 1 мкс, кроме переходов, у которых явно указана задержка: переходы $t_9, t_{18}, t_{24}, t_8, t_{16}, t_{25}$ с задержками $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ соответственно. Данные задержки представляют собой время для передачи пакетов ЗУС (t_8, t_9), ПУС (t_{16}, t_{18}) и СУ (t_{24}, t_{25}) по сети.

Для моделирования истечения таймеров T_{con} , T_{cnf} , T_{set} , благодаря которым определяется актуальность принятых пакетов ЗУС, ПУС и СУ, задаются интервалы срабатывания (верхняя и нижняя границы срабатывания) для следующих переходов:

1) t_{11} – срабатывание перехода означает повторную отправку пакета ЗУС по истечении таймера T_{con} при условии, что пакет ПУС не был принят. Для данного перехода задана задержка $[T+T_{con}, T+T_{con}]$ – переход сработает в момент времени $T+T_{con}$, где T – время, в которое таймер T_{con} был взведен;

2) t_{21} – срабатывание перехода означает повторную отправку ПУС по истечении таймера T_{cnf} при условии, что пакет СУ не был принят. Для данного перехода задана задержка $[T+T_{cnf}, T+T_{cnf}]$ – переход сработает в момент времени $T+T_{cnf}$ где T – время, в которое таймер T_{cnf} был взведен;

3) t_{15} – срабатывание перехода означает отправку пакета СУ после того, как пакет ПУС с параметром **Успех** был принят до истечения таймера T_{con} . Для данного перехода задана задержка $[T, T+T_{con}]$ – переход может сработать с момента взведения (T) до момента срабатывания таймера T_{con} ;

4) t_{23} – срабатывание перехода означает повторную отправку СУ после повторного приема пакета ПУС до истечения таймера T_{set} . Для данного перехода задана задержка $[T, T+T_{set}]$ – переход может сработать с момента взведения (T) до момента срабатывания таймера T_{set} ;

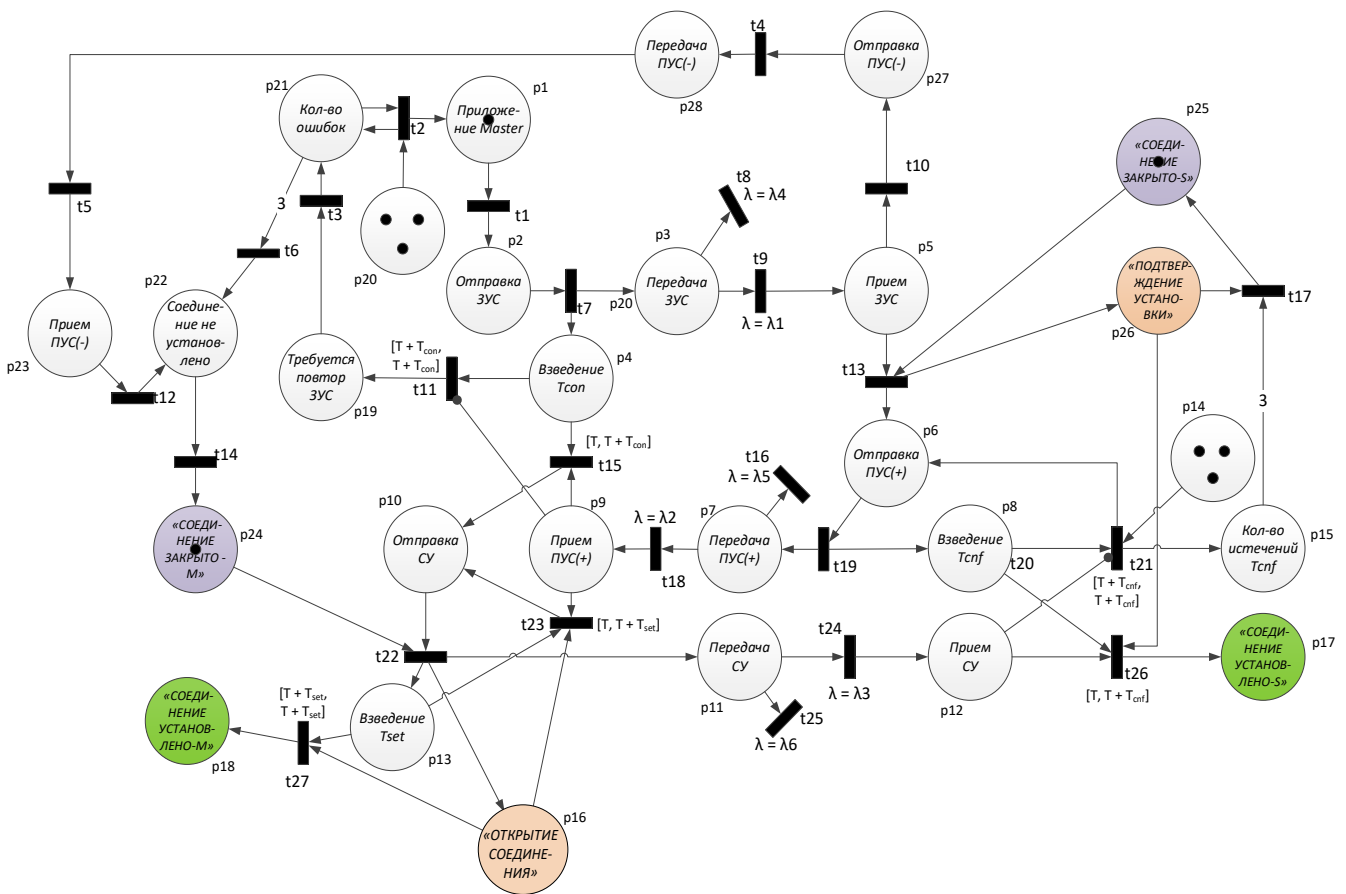
5) t_{26} – срабатывание перехода означает прием пакета СУ до истечения таймера T_{cnf} и переход ведомого устройства в состояние **Соединение установлено – ведомое**. Для данного перехода задана задержка $[T, T+T_{cnf}]$ – переход может сработать с момента взведения (T) до момента срабатывания таймера T_{cnf} ;

6) t_{27} – срабатывание перехода означает истечение таймера T_{set} и переход ведущего устройства в состояние **Соединение установлено – ведущее**. Для данного перехода задана задержка $[T+T_{set}, T+T_{set}]$ – переход сработает в момент времени $T+T_{set}$, где T – время, в которое таймер T_{set} был взведен.

В сети Петри также предусмотрены переходы, которые иллюстрируют потерю пакетов ЗУС (t_8), ПУС (t_{16}), СУ (t_{25}) при передаче по сети.

Рассмотрим позиции, представляющие собой состояния ведущего (рис. 5) и ведомого (рис. 6) устройств:

– позиция p_{24} – состояние **Соединение закрыто** для ведущего устройства. В начальной разметке в данной позиции находится фишка;



• Рис. 9. Временная ингибиторная сеть Петри для механизма установки транспортного соединения
 • Fig. 9. Timed inhibitory Petri net for transport connection establishment mechanism

– позиция p_{26} – состояние **Соединение закрыто** для ведомого устройства. В начальной маркировке в данной позиции находится фишка;

– позиция p_{16} – состояние **Открытие соединения** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета СУ (после срабатывания перехода t_{22});

– позиция p_{26} – состояние **Подтверждение установки** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после приема пакета ЗУС (после срабатывания перехода t_{13});

– позиция p_{18} – состояние **Соединение установлено** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается при истечении таймера T_{set} (после срабатывания перехода t_{27});

– позиция p_{17} – состояние **Соединение установлено** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после приема пакета СУ (после срабатывания перехода t_{26}).

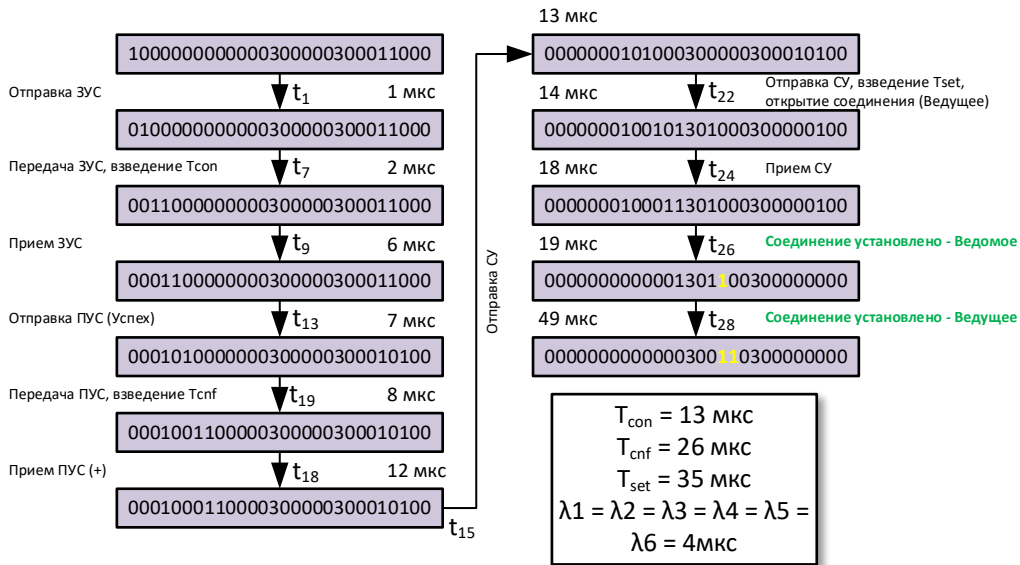
Построенная сеть Петри позволяет исследовать случаи возникновения ошибок при открытии соединения. Например, когда по каким-либо причинам пакет подтверждения установки соединения (ПУС) не был получен ведущим устрой-

ством и соответствующий таймер T_{con} истек три раза. Для моделирования данного события в сеть добавлена позиция p_{20} , в которой в начальной маркировке находятся три фишки (возможные три ошибки). По истечении таймера T_{con} (переход t_{11}) потребуется повторная отправка ЗУС (фишка в p_{19}), и станет разрешенным переход t_2 . При срабатывании перехода t_2 из состояния p_{20} извлекается одна фишка, в состояние p_{21} (количество допущенных ошибок) добавляется одна фишка. Таким образом, срабатывание данного перехода становится возможным только три раза.

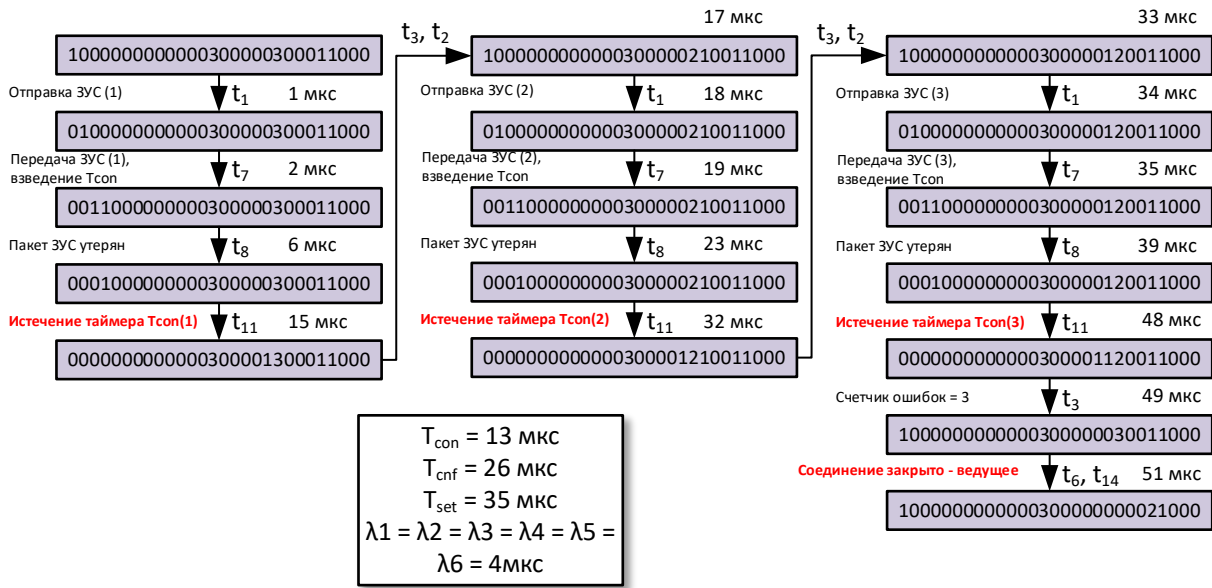
Рассмотрим пример работы временной ингибиторной сети Петри в случае успешной установки транспортного соединения. На рис. 10 показана ветка дерева достижимости временной ингибиторной сети Петри.

В приведенном примере установка соединения происходит со следующими параметрами:

- 1) таймер $T_{con} = 13$ мкс;
- 2) таймер $T_{cnf} = 26$ мкс;
- 3) таймер $T_{set} = 35$ мкс;
- 4) время отправки пакетов ЗУС, ПУС, СУ ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6$) составляет 4 мкс.



• *Рис. 10. Ветка дерева достижимости для случая успешной установки соединения*
 • *Fig. 10. Reachability tree branch for the case of successful connection establishment*



• *Рис. 11. Ветка дерева достижимости для случая возникновения ошибки*
 • *Fig. 11. Reachability tree branch for error case*

На построенной ветке дерева достижимости взведение таймера T_{con} происходит в момент времени $T_1 = 2$ мкс (переход t_7). Это означает, что пакет ПУС должен быть получен до 15 мкс ($T_1 + T_{con}$). Прием пакета ПУС (переход t_{18}) происходит в момент времени 12 мкс, поэтому ошибки не произошло.

Таймер T_{cnf} взводится в момент времени $T_2 = 8$ мкс (переход t_{19}). Это означает, что пакет СУ должен быть получен до 34 мкс ($T_2 + T_{cnf}$). Прием пакета СУ (переход t_{24}) происходит в мо-

мент времени 18 мкс, поэтому ошибки не произошло.

Таймер T_{set} взводится в момент времени $T_3 = 14$ мкс. Это означает, что ведущее устройство должно ожидать до 49 мкс ($T_3 + T_{set}$) для перехода в состояние **Соединение установлено – ведущее**. В момент времени 49 мкс переход срабатывает, ошибки не произошло.

На рис. 11 показана ветка дерева достижимости сети Петри, которая иллюстрирует пример возникновения ошибки при установке соедине-

ния. В данном примере пакет ЗУС был утерян (переход t_8) три раза, поэтому пакет ПУС не был получен ведущим устройством до трехкратного истечения таймера T_{con} .

Истечение таймера иллюстрирует переход t_{11} . После истечения таймера в третий раз ведущее устройство прекращает попытку установки соединения (переходы t_6, t_{14}).

Сеть Петри для механизма закрытия транспортного соединения

Для моделирования работы механизма закрытия транспортного соединения протокола СТП-ИСС-14 построена временная ингибиторная сеть Петри (рис. 12).

В представленной сети Петри задержка срабатывания переходов составляет 1 мкс, кроме переходов, у которых явно указана задержка: переходы $t_9, t_{18}, t_{24}, t_8, t_{16}, t_{25}$ с задержками $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ соответственно. Данные задержки представляют собой время для передачи пакетов ЗЗС (t_8, t_9), ПЗС (t_{16}, t_{18}) и СЗ (t_{24}, t_{25}) по сети.

Для моделирования истечения таймеров $T_{cls}, T_{cls_cnf}, T_{disc}$, благодаря которым определяется актуальность принятых пакетов ЗЗС, ПЗС и СЗ, задаются интервалы срабатывания (верхняя и нижняя границы срабатывания) для следующих переходов:

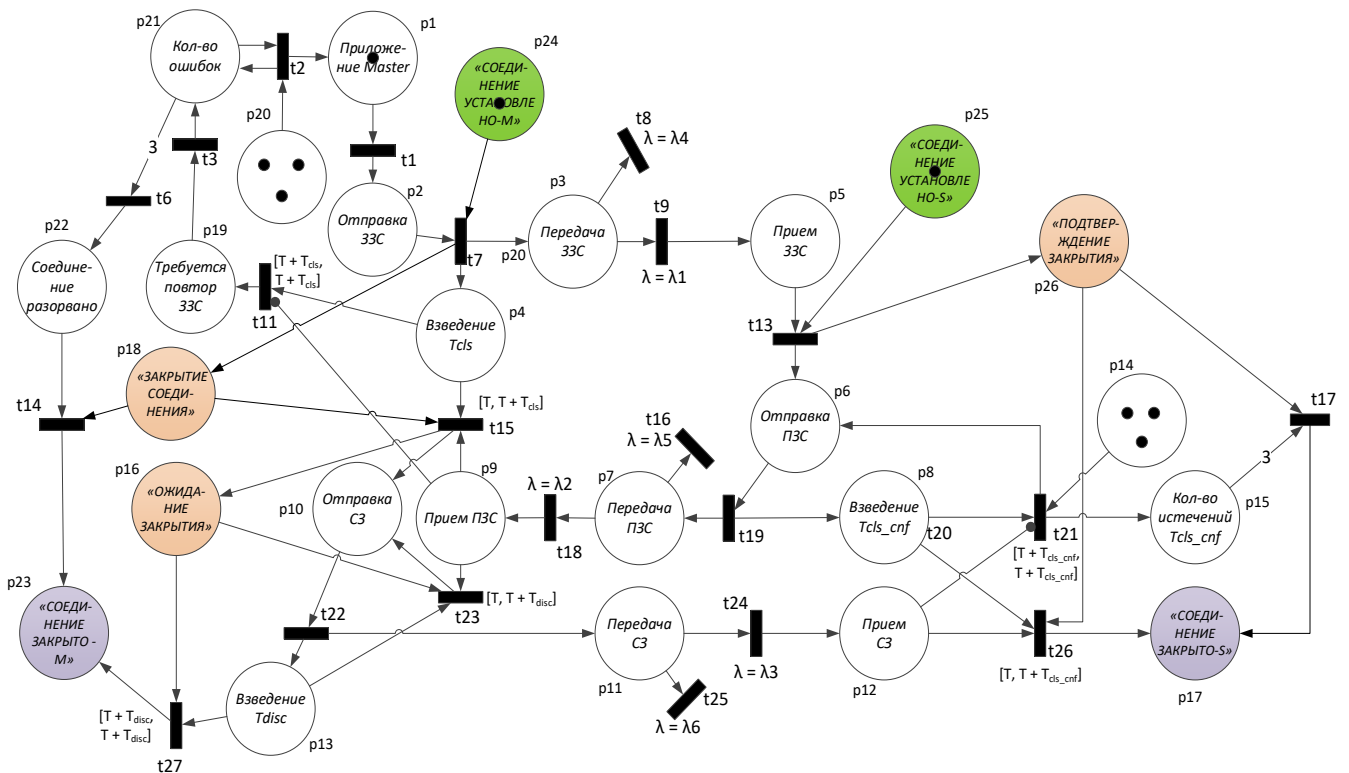
1) t_{11} – срабатывание перехода означает повторную отправку пакета ЗЗС по истечении таймера T_{cls} при условии, что пакет ПЗС не был принят. Для данного перехода задана задержка $[T+T_{cls}, T+T_{cls}]$ – переход сработает в момент времени $T+T_{cls}$, где T – время, в которое таймер T_{cls} был взведен;

2) t_{21} – срабатывание перехода означает повторную отправку ПЗС по истечении таймера T_{cls_cnf} при условии, что пакет СЗ не был принят. Для данного перехода задана задержка $[T+T_{cls_cnf}, T+T_{cls_cnf}]$ – переход сработает в момент времени $T+T_{cls_cnf}$ где T – время, в которое таймер T_{cls_cnf} был взведен;

3) t_{15} – срабатывание перехода означает отправку пакета СЗ после того, как пакет ПЗС был принят до истечения таймера T_{cls} . Для данного перехода задана задержка $[T, T+T_{cls}]$ – переход может сработать с момента взведения (T) до момента срабатывания таймера T_{cls} ;

4) t_{23} – срабатывание перехода означает повторную отправку СЗ после повторного приема пакета (ПЗС) до истечения таймера T_{disc} . Для данного перехода задана задержка $[T, T+T_{disc}]$ – переход может сработать с момента взведения (T) до момента срабатывания таймера T_{disc} ;

5) t_{26} – срабатывание перехода означает прием пакета СЗ до истечения таймера T_{cls_cnf} и переход



• Рис. 12. Временная ингибиторная сеть Петри для механизма закрытия транспортного соединения
 • Fig. 12. Timed inhibitory Petri net for transport connection closure mechanism

ведомого устройства в состояние **Соединение закрыто – ведомое**. Для данного перехода задана задержка $[T, T+T_{cls_cnf}]$ – переход может сработать с момента возведения (T) до момента срабатывания таймера T_{cls_cnf} ;

б) t_{27} – срабатывание перехода означает истечение таймера T_{disc} и переход ведущего устройства в состояние **Соединение установлено – ведущее**. Для данного перехода задана задержка $[T+T_{disc}, T+T_{disc}]$ – переход сработает в момент времени $T+T_{disc}$, где T – время, в которое таймер T_{disc} был взведен.

В сети Петри также предусмотрены переходы, которые иллюстрируют потерю пакетов ЗЗС (t_8), ПЗС (t_{16}), СЗ (t_{25}) при передаче по сети.

Рассмотрим позиции, представляющие собой состояния ведущего (рис. 5) и ведомого (рис. 6) устройств:

– позиция p_{24} – состояние **Соединение установлено – ведущее** для ведущего устройства. В начальной маркировке в данной позиции находится фишка;

– позиция p_{25} – состояние **Соединение установлено – ведомое** для ведомого устройства. В начальной маркировке в данной позиции находится фишка;

– позиция p_{18} – состояние **Закрытие соединения** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета ЗЗС (после срабатывания перехода t_7);

– позиция p_{16} – состояние **Ожидание закрытия** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета СЗ (после срабатывания перехода t_{15});

– позиция p_{26} – состояние **Подтверждение закрытия** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета ПЗС (после срабатывания перехода t_{13});

– позиция p_{23} – состояние **Соединение закрыто** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается при истечении таймера T_{disc} (после срабатывания перехода t_{27}), либо после разрыва соединения (после срабатывания перехода t_{14});

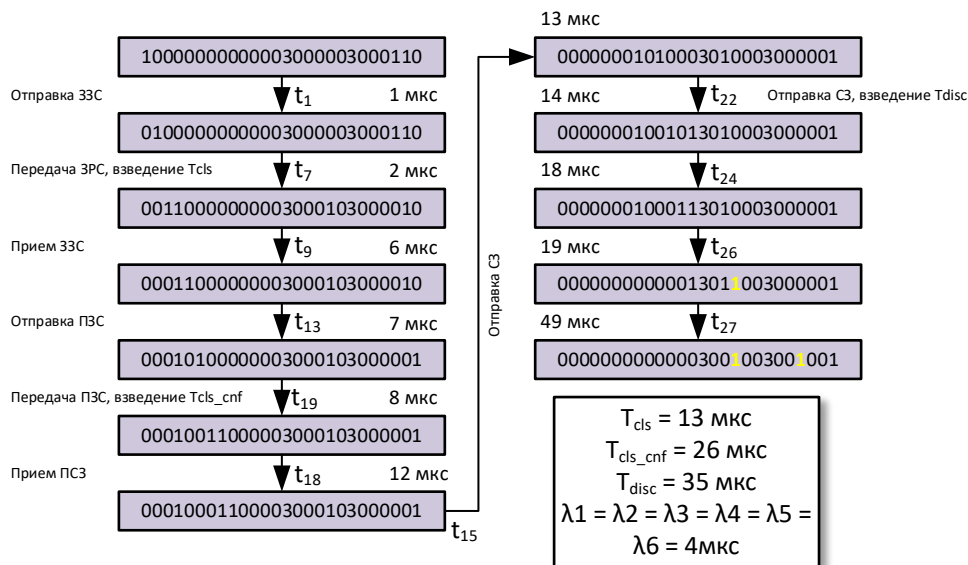
– позиция p_{17} – состояние **Соединение закрыто** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после приема пакета СЗ (после срабатывания перехода t_{26}), либо после трехкратного истечения таймера T_{cls_cnf} (после срабатывания перехода t_{17}).

Рассмотрим пример работы временной ингибиторной сети Петри в случае успешного закрытия транспортного соединения. На рис. 13 показана ветка дерева достижимости временной ингибиторной сети Петри.

В приведенном примере установка соединения происходит со следующими параметрами:

- 1) таймер $T_{cls} = 13$ мкс;
- 2) таймер $T_{cls_cnf} = 26$ мкс;
- 3) таймер $T_{disc} = 35$ мкс;
- 4) время отправки пакетов ЗЗС, ПЗС, СЗ ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6$) составляет 4 мкс.

На построенной ветке дерева достижимости взведение таймера T_{cls} происходит в момент времени $T_1 = 2$ мкс (переход t_7). Это означает, что пакет ПЗС должен быть получен до 15 мкс ($T_1 + T_{cls}$). Прием пакета ПЗС (переход t_{18}) происходит в момент времени 12 мкс, поэтому ошибки не произошло.



• Рис. 13. Ветка дерева достижимости для случая успешного закрытия соединения
 • Fig. 13. Reachability tree branch for the case of successful connection closure

Таймер $T_{\text{cls_cnf}}$ взводится в момент времени $T_2 = 8$ мкс (переход t_{19}). Это означает, что пакет СЗ должен быть получен до 34 мкс ($T_2 + T_{\text{cls_cnf}}$). Прием пакета СЗ (переход t_{24}) происходит в момент времени 18 мкс, поэтому ошибки не произошло.

Таймер T_{disc} взводится в момент времени $T_3 = 14$ мкс. Это означает, что ведущее устройство должно ожидать до 49 мкс ($T_3 + T_{\text{disc}}$) для перехода в состояние **Соединение установлено – ведущее**. В момент времени 49 мкс переход срабатывает, ошибки не произошло.

Заключение

В данной статье представлены две модели – модель механизма установки транспортного соединения и модель механизма закрытия транспортного соединения.

Важным элементом данных механизмов являются таймеры. Для моделирования таймеров ис-

пользовались временные сети Петри с жестким временем. Этот подкласс сетей Петри позволил смоделировать взведение и истечение различных таймеров, а также реализовать проверку актуальности принятых пакетов. Также для проверки возможности срабатывания определенных таймеров использовались ингибиторные дуги.

В построенных моделях используются различные входные параметры – значения таймеров и задержек. Благодаря этому есть возможность проверять различные сценарии работы. Построение дерева достижимости позволяет получить все возможные варианты работы механизмов при конкретных заданных параметрах. Приведены примеры сценариев работы механизмов в виде отдельных ветвей деревьев достижимости.

Представленные модели могут быть использованы для анализа, верификации и тестирования реализаций механизмов открытия и закрытия транспортных соединений. На их основе также могут быть построены модели для других механизмов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire / Ю. Е. Шейнин [и др.] // Исследования наукограда. 2016. № 1-2. С. 21–30.
2. SpaceWire Standard. ECSS-E-ST-50-12C. Space engineering SpaceWire – links, nodes, routers and networks. 2008. 137 p.
3. Оленев В. Л. Моделирование систем: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2015. 95 с.
4. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.

REFERENCES

1. Sheynin Yu. E., Olenov V. L., Lavrovskaya I. Y., Dymov D. V., Kochura S. G. Development, analysis and design of the STP-ISS transport protocol for SpaceWire onboard space networks. Issledovaniya naukoграда = Science city research. 2016;(1-2):21–30. (In Russ.).
2. SpaceWire Standard. ECSS-E-ST-50-12C. Space engineering SpaceWire – links, nodes, routers and networks. 2008. 137 p.
3. Olenov V. L. Modeling of the systems: study guide. SPb.: SUAI; 2015. 95 p. (In Russ.).
4. Kotov V. E. Petri nets. Moscow: Nauka; 1984. 160 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чумакова Надежда Юрьевна, старший преподаватель кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование, бортовые вычислительные сети, коммуникационные протоколы.

Chumakova Nadezhda Yu., Senior Lecturer at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling, on-board networks, communication protocols.

Мамонтова Анна Алексеевна, магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование, бортовые вычислительные сети, коммуникационные протоколы.

Поступила в редакцию 29.09.2024

Поступила после рецензирования 03.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Mamontova Anna A., Master's Student at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling, on-board networks, communication protocols.

Received 29.09.2024

Revised 03.10.2024

Accepted 10.10.2024

О периодических колебаниях цепочки Toda

Александр Олегович Смирнов¹

✉ alsmir@guap.ru, orcid.org/0000-0002-6781-2105, SPIN-код: 7228-3916

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Цепочка Toda – это одна из первых дифференциально-разностных нелинейных интегрируемых моделей. Достаточно давно известны условия, приводящие к периодичности ее по номеру узла цепочки. Вместе с тем условия, приводящие к периодическим по времени решениям этой модели, до сих пор не были описаны. В представленной работе приведены условия, при которых почти периодическое по времени конечнозонное решение цепочки Toda будет вещественным и периодическим.

Ключевые слова: цепочка Toda, тэта-функция, спектральная кривая, конечнозонное решение, интегрируемое нелинейное уравнение

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-11-00196 (<https://rscf.ru/project/22-11-00196/>).

Для цитирования: Смирнов А. О. О периодических колебаниях цепочки Toda // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 87–93. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-87-93.

Original article

On periodic oscillations of the Toda chain

Aleksandr O. Smirnov¹

✉ alsmir@guap.ru, orcid.org/0000-0002-6781-2105, SPIN-code: 7228-3916

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The Toda chain is one of the first differential–difference nonlinear integrable models. The conditions leading to its periodicity by the number of the chain node have been known for a long time. However, the conditions leading to time-periodic solutions of this model have not yet been described. The present paper presents the conditions under which an almost periodic finite-zone solution of the Toda chain will be real and periodic.

Keywords: Toda chain, theta function, spectral curve, finite zone solution, integrable nonlinear equation

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation, grant 22-11-00196 (<https://rscf.ru/project/22-11-00196/>).

For citation: Smirnov A. O. On periodic oscillations of the Toda chain. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):87–93. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-87-93.

Введение

Уравнение цепочки Toda [1, 2]

$$\partial_t^2 x_n = e^{x_{n+1} - x_n} - e^{x_n - x_{n-1}} \quad (1)$$

является одним из немногих нелинейных дифференциально-разностных уравнений, которое может быть решено точно [3–11]. Данная модель описывает цепочку точечных объектов, сила взаимодействия между которыми пропорциональна экспоненте от расстояния между этими объектами. В равновесном состоянии, когда все объекты находятся на равном расстоянии друг от друга, силы уравновешивают друг друга, и цепочка находится в покое. Если равновесие нарушить, то вдоль цепочки распространяются нелинейные

волны. Как правило, рассматривают одну из следующих моделей:

1) периодическая по номеру цепочка Toda: $x_{n+N} \equiv x_n$. Модель соответствует случаю, когда узлы цепочки находятся на окружности;

2) цепочка Toda с зафиксированными концами на конечном промежутке: $x_0 = a, x_N = b$;

3) бесконечная цепочка, по которой распространяются уединенные или почти периодические волны. Используется для описания поведения узлов достаточно длинной цепочки вдали от ее концов.

Заметим, что для уравнения (1) иногда используется альтернативное представление:

$$\partial_t v_n = c_{n+1} - c_n, \quad \partial_t c_n = c_n(v_n - v_{n-1}),$$

где $c_n = \exp(x_n - x_{n-1})$, $v_n = \partial_t x_n$.

Периодические по времени колебания цепочки Тода были найдены ранее только для отдельных частных случаев. В настоящей работе предлагается счетное множество периодических по t решений уравнения (1), соответствующих модели бесконечной цепочки Тода. Для построения периодического решения будет использована формула Кричевера [10–13], параметры которой выбираются специальным образом. Предложенный набор параметров выделяет из почти периодических по времени решений цепочки Тода вещественные периодические по времени решения.

Почти периодические конечнозонные решения цепочки Тода

Для построения конечнозонных решений цепочки Тода используется гиперэллиптическая кривая $\Gamma = \{(\chi, \lambda)\}$ рода g :

$$\Gamma: \chi^2 = \prod_{j=1}^{2g+2} (\lambda - \lambda_j) \quad (2)$$

с двумя бесконечно удаленными точками P_∞^\pm :

$$\chi = \pm \left(\lambda^{g+1} + O(\lambda^g) \right), P \rightarrow P_\infty^\pm.$$

Как обычно (см., например, [12–14]) зададим на ней канонический базис циклов, нормированные голоморфные гиперэллиптические дифференциалы:

$$dU_k = \sum_{j=1}^g \frac{c_{kj} \lambda^{g-j} d\lambda}{\chi}, \oint_{a_j} dU_k = \delta_{jk},$$

а также нормированные абелевы интегралы второго и третьего рода со следующей асимптотикой в бесконечно удаленных точках P_∞^\pm :

$$\begin{aligned} \Omega_1(P) &= \mp \frac{1}{2} \left(\lambda - R_1 + O(\lambda^{-1}) \right), P \rightarrow P_\infty^\pm, \\ \omega_0(P) &= \pm \left(\ln \lambda - \ln R_0 + O(\lambda^{-1}) \right), P \rightarrow P_\infty^\pm, \\ \chi &= \pm \left(\lambda^{g+1} + O(\lambda^g) \right), P \rightarrow P_\infty^\pm, \\ \oint_{a_k} d\Omega_1 &= 0, \oint_{a_k} d\omega_0 = 0, k = 1, \dots, g. \end{aligned} \quad (3)$$

Определим также матрицу и векторы b -периодов рассмотренных интегралов:

$$(\mathbf{B})_{jk} = \oint_{b_j} dU_k, (\mathbf{V}^1)_j = \frac{1}{2\pi i} \oint_{b_j} d\Omega_1, (\mathbf{A})_j = \frac{1}{2\pi i} \oint_{b_j} d\omega_0.$$

Напомним (см., например, [13]), что

$$\Delta = \mathbf{U}(P_\infty^-) - \mathbf{U}(P_\infty^+) = 2\mathbf{U}(P_\infty^-).$$

Построим по матрице периодов \mathbf{B} зэта-функцию Римана [15]:

$$\begin{aligned} & \Theta[\eta^t; \zeta^t](\mathbf{p} | \mathbf{B}) = \\ &= \sum_{\mathbf{m} \in \mathbb{Z}^g} \exp \left\{ \pi i (\mathbf{m} + \eta)^t \mathbf{B} (\mathbf{m} + \eta) + 2\pi i (\mathbf{m} + \eta)^t (\mathbf{p} + \zeta) \right\}, \\ & \Theta[\mathbf{0}^t; \mathbf{0}^t](\mathbf{p} | \mathbf{B}) \equiv \Theta(\mathbf{p} | \mathbf{B}) \equiv \Theta(\mathbf{p}). \end{aligned} \quad (4)$$

В этих обозначениях конечнозонные решения цепочки Тода имеют вид [13]:

$$\begin{aligned} x_n &= n \ln R_0^2 - R_1 t + \ln \left(\frac{\Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^-, t)) \Theta(\mathbf{A}(0, P_\infty^+, 0))}{\Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^+, t)) \Theta(\mathbf{A}(0, P_\infty^-, 0))} \right), \\ c_n &= R_0^2 \frac{\Theta(\mathbf{A}(n+1, P_\infty^-, t)) \Theta(\mathbf{A}(n-1, P_\infty^-, t))}{\Theta^2(\mathbf{A}(n, P_\infty^-, t))}, \\ v_n &= -R_1 + \partial_t \ln \left(\frac{\Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^-, t))}{\Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^+, t))} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(n, P, t) &= \mathbf{U}(P) + n\Delta + \mathbf{V}^1 t + \mathbf{Z}, \\ \mathbf{A}(n+1, P_\infty^+, t) &= \mathbf{A}(n, P_\infty^-, t), \end{aligned}$$

\mathbf{Z} – вектор начальной фазы.

В случае спектральной кривой (2) общего положения функции (5) будут почти периодическими по t .

Эллиптические конечнозонные потенциалы оператора Шредингера

Эллиптические конечнозонные потенциалы

$$\begin{aligned} u(x) &= m_0(m_0 + 1)\wp(x) + \\ &+ \sum_{j=1}^3 m_j(m_j + 1)\wp(x - \omega_j), m_k \in \mathbb{Z}, \end{aligned} \quad (6)$$

оператора Шредингера

$$-\Psi_{xx} + u\Psi = E\Psi, \quad (7)$$

по-видимому, впервые появились в работах Дарбу и других французских математиков конца XIX в. (см., например, [16, 17]), а затем вновь привлекли к себе внимание после появления работ Трейбича и Вердые [18–20]. Именно поэтому потен-

циалы такого вида сначала называли потенциалами Трейбича – Вердье, а впоследствии – Дарбу – Трейбича – Вердье (ДТВ). Вслед за Трейбичем и Вердье к исследованиям этих уравнений присоединились и другие математики и физики [21–26]. Здесь $\wp(x)$ есть эллиптическая функция Вейерштрасса [27, 28], удовлетворяющая уравнению:

$$[\wp'(x)]^2 = 4\wp^3(x) - g_2\wp(x) - g_3 = 4 \prod_{j=1}^2 (\wp(x) - e_j),$$

где

$$e_j = \wp(\omega_j), \wp(x + 2\omega_j) \equiv \wp(x), \\ e_1 > e_2 > e_3, e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Уравнение спектральной кривой конечнозонного потенциала (6) оператора (7) имеет вид:

$$w^2 = \prod_{m=1}^{2g_0+1} (E - E_m). \quad (8)$$

Алгоритм вычисления точек ветвления E_m спектральной кривой (8) приведен в работе [25]. Из спектральной теории дифференциальных операторов следует, что точки ветвления E_m лежат на действительной оси в следующих случаях:
 $-m_2 = m_3 = 0$ или $m_0 = m_1 = 0$;
 $-m_1 = m_2 = 0$ или $m_0 = m_3 = 0$.

Связь между конечнозонными решениями цепочки Toda и эллиптическими потенциалами оператора Шредингера

Положим $w = \chi, E = \lambda^2 + \rho$, где $\rho < E_m, m = 1, \dots, 2g_0 + 1$. В этом случае уравнение (8) примет вид:

$$\chi^2 = \prod_{m=1}^{2g_0+1} (\lambda^2 + \rho - E_m),$$

или

$$\Gamma : \chi^2 = \prod_{m=1}^{2g_0+1} (\lambda^2 - s_m^2), \quad (9)$$

где $s_m^2 = E_m - \rho$. Нетрудно видеть, что уравнение (9) имеет вид (2), где $g = 2g_0$.

Из уравнения (9) следует, что на спектральной кривой Γ существуют три инволюции:

1) гиперэллиптическая –

$$\tau_0 : (\chi, \lambda) \rightarrow (-\chi, \lambda), \tau_0 P_\infty^\pm = P_\infty^\mp;$$

2) голоморфная –

$$\tau_h : (\chi, \lambda) \rightarrow ((-1)^{g+1} \chi, -\lambda), \tau_h P_\infty^\pm = P_\infty^\pm;$$

3) антиголоморфная –

$$\tau_a : (\chi, \lambda) \rightarrow (\chi^*, \lambda^*), \tau_a P_\infty^\pm = P_\infty^\pm.$$

Выберем на кривой (9) канонический базис циклов, преобразующийся под действием голоморфной и антиголоморфной инволюций по следующим правилам:

$$\tau_h a_j = -a_{g+1-j}, \tau_h b_j = -b_{g+1-j}, \\ \tau_a a_j = a_j, \tau_a b_j = -b_j.$$

В этом случае выполняются следующие соотношения:

$$\tau_h dU_j = -dU_{g+1-j}, \tau_h d\Omega_1 = -d\Omega_1, \tau_h d\omega_0 = d\omega_0, \\ \tau_a dU_j = (dU_j)^*, \tau_a d\Omega_1 = (d\Omega_1)^*, \tau_a d\omega_0 = (d\omega_0)^*$$

и

$$\mathbf{M}_g^t \mathbf{B} \mathbf{M}_g = \mathbf{B}, \mathbf{B}^* = -\mathbf{B}, \\ \mathbf{M}_g^t \mathbf{V}^1 = \mathbf{V}^1, (\mathbf{V}^1)^* = \mathbf{V}^1, R_1 = 0, \\ \mathbf{M}_g^t \Delta = \mathbf{e} - \Delta, \Delta^* = \Delta, R_0^* = R_0, \quad (10)$$

где $(\mathbf{M}_g)_{kj} = \delta_{k, g+1-j}$; $(\mathbf{e})_j = 1$; $\mathbf{M}_g^t = \mathbf{M}_g$, $\mathbf{M}_g^2 = \mathbf{I}_g$; \mathbf{I}_g – единичная матрица.

Из уравнений (10) и определения тэта-функции (4) вытекает следующее равенство:

$$\left(\Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t)) \right)^* = \Theta(-(\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t))^*) = \\ = \Theta(-\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t) + \mathbf{Z} - \mathbf{Z}^*) = \Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t) - \mathbf{Z} + \mathbf{Z}^*).$$

Следовательно, решения (5) будут вещественными при выполнении условия $\text{Im}(\mathbf{Z}) = 1/2 \text{Im}(\mathbf{B})\mathbf{N}$, где $\mathbf{N} \in \mathbb{Z}^g$.

Наличие голоморфной инволюции τ_h приводит к тому, что Γ накрывает две кривые меньшего рода (род каждой кривой равен g_0):

$$\Gamma_+ : w_+^2 = \prod_{j=1}^{2g_0+1} (E - s_j^2), \Gamma_- : w_-^2 = E \prod_{j=1}^{2g_0+1} (E - s_j^2),$$

где $E = \lambda^2, w_+ = \chi, w_- = \lambda\chi$ и

$$\frac{E^k dE}{w_+} = 2 \frac{\lambda^{2k+1} d\lambda}{\chi}, \frac{E^k dE}{w_-} = 2 \frac{\lambda^{2k} d\lambda}{\chi}.$$

При подходящем выборе базисов циклов на спектральных кривых отображения между кри-

выми порождают следующие отображения базисов циклов:

$$\begin{aligned} (a_1, \dots, a_{2g_0})^t &\rightarrow \mathbf{S}(a_1^+, \dots, a_{g_0}^+, a_1^-, \dots, a_{g_0}^-)^t, \\ (b_1, \dots, b_{2g_0})^t &\rightarrow \mathbf{R}(b_1^+, \dots, b_{g_0}^+, b_1^-, \dots, b_{g_0}^-)^t, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\mathbf{S} = \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{g_0} & \mathbf{I}_{g_0} \\ \mathbf{M}_{g_0} & -\mathbf{M}_{g_0} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}^t \mathbf{R} = 2\mathbf{I}_{2g_0}. \quad (12)$$

Поскольку (см., например, [12, 14]) нормированные голоморфные дифференциалы связаны равенством

$$\begin{pmatrix} d\mathbf{U}^+ \\ d\mathbf{U}^- \end{pmatrix} = \mathbf{S}^t d\mathbf{U},$$

то выполняются следующие соотношения ($j = 1, \dots, g_0$):

$$\begin{aligned} dU_j &= \frac{1}{2}(dU_j^+ + dU_j^-), \\ dU_{g_0+j} &= \frac{1}{2}(dU_{g_0+1-j}^+ - dU_{g_0+1-j}^-). \end{aligned} \quad (13)$$

Из соотношений (11), (13) вытекает следующее равенство (см., например, [12, 14]):

$$\mathbf{S}^t \mathbf{B} \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 2\mathbf{B}^+ & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 2\mathbf{B}^- \end{pmatrix},$$

где \mathbf{B}^\pm есть матрицы b -периодов голоморфных дифференциалов $d\mathbf{U}^\pm$.

Из соотношения $\tau_h d\Omega_1 = -d\Omega_1$ вытекает следующее соотношение:

$$\begin{aligned} d\Omega_1 &= -\frac{1}{2} \left(\lambda^{2g_0} + \sum_{k=1}^{g_0} f_k \lambda^{2g_0-2k} \right) \frac{\lambda d\lambda}{\chi} = \\ &= -\frac{1}{4} \left(E^{g_0} + \sum_{k=1}^{g_0} f_k E^{g_0-k} \right) \frac{dE}{w_+} = \frac{i}{4} d\Omega_1^+, \end{aligned}$$

где $\Omega_1^+(Q)$ – абелев интеграл второго рода, $Q \in \Gamma_+$;

$$\begin{aligned} \Omega_1^+(Q) &= i \left(\xi^{-1} + O(\xi) \right), \quad Q \rightarrow Q_\infty, \\ w_+ &= \xi^{-2g_0-1} + O(\xi), \quad Q \rightarrow Q_\infty; \end{aligned}$$

ξ – локальный параметр в окрестности точки Q_∞ , $E = \xi^{-2}$.

Вычисляя с помощью (11) периоды интеграла $\Omega_1^+(Q)$, получаем:

$$0 = \oint_{a_k} d\Omega_1 = \sum_{m=1}^{g_0} S_{km} \oint_{a_m^+} \frac{i}{4} d\Omega_1^+ \Rightarrow \oint_{a_m^+} d\Omega_1^+ = 0$$

и

$$\begin{aligned} (\mathbf{V}^1)_k &= \frac{1}{2\pi i} \oint_{b_k} d\Omega_1 = \sum_{m=1}^{g_0} R_{km} \frac{1}{2\pi i} \oint_{b_m^+} \frac{i}{4} d\Omega_1^+ = \\ &= \frac{i}{4} \sum_{m=1}^{g_0} R_{km} (\mathbf{W}^1)_m \Rightarrow \\ \Rightarrow \mathbf{V}^1 &= \frac{i}{4} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{g_0} \\ \mathbf{M}_{g_0} \end{pmatrix} \mathbf{W}^1, \quad \text{где } (\mathbf{W}^1)_m = \frac{1}{2\pi i} \oint_{b_m^+} d\Omega_1^+. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\mathbf{S}^t \mathbf{V}^1 = \frac{i}{4} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{g_0} & \mathbf{M}_{g_0} \\ \mathbf{I}_{g_0} & -\mathbf{M}_{g_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{g_0} \\ \mathbf{M}_{g_0} \end{pmatrix} \mathbf{W}^1 = \frac{i}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{W}^1 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}.$$

Из соотношения $\tau_h d\omega_0 = d\omega_0$ имеем:

$$\begin{aligned} d\omega_0 &= - \left(\lambda^{2g_0} + \sum_{k=1}^{g_0} h_k \lambda^{2g_0-2k} \right) \frac{d\lambda}{\chi} = \\ &= -\frac{1}{2} \left(E^{g_0} + \sum_{k=1}^{g_0} h_k E^{g_0-k} \right) \frac{dE}{w_-} = \frac{1}{2} d\omega_0^-, \end{aligned}$$

где $\omega_0^-(\hat{P})$ – абелев интеграл третьего рода, $\hat{P} \in \Gamma_-$;

$$\begin{aligned} \omega_0^-(\hat{P}) &= \mp \left(\ln E - \ln \hat{R}_0 + O(E^{-1}) \right), \quad \hat{P} \rightarrow \hat{P}_\infty^\pm, \\ w_- &= \pm (E^{g_0+1} + O(E^{g_0})), \quad \hat{P} \rightarrow \hat{P}_\infty^\pm. \end{aligned}$$

Вычисляя с помощью (11) a -периоды данного интеграла, получаем:

$$0 = \oint_{a_k} d\omega_0 = \sum_{m=1}^{g_0} S_{k,g_0+m} \oint_{a_m^-} \frac{1}{2} d\omega_0^- \Rightarrow \oint_{a_m^-} d\omega_0^- = 0.$$

Следовательно, он нормированный, и поэтому выполняется следующее равенство:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{b_j^-} d\omega_0^- = \tilde{\Delta}_j^- = U_j^-(\hat{P}_\infty^+) - U_j^-(\hat{P}_\infty^-),$$

где путь интегрирования, соединяющий бесконечно удаленные точки, не пересекает ни один из базисных циклов. То есть

$$\tilde{\Delta}_j^- = 2 \int_0^{\infty} dU_j^-.$$

Вычисляя координаты вектора Δ , имеем ($1 \leq j \leq g_0$):

$$\begin{aligned} \Delta_j &= 2 \int_{-s_{2g_0+1}}^{-\infty} dU_j = \\ &= - \int_{s_{2g_0+1}}^{+\infty} dU_j^+ + \int_{s_{2g_0+1}}^{+\infty} dU_j^- = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Delta_j^-, \\ \Delta_{g_0+j} &= 2 \int_{-s_{2g_0+1}}^{-\infty} dU_{g_0+j} = \\ &= - \int_{s_{2g_0+1}}^{+\infty} dU_{g_0+1-j}^+ - \int_{s_{2g_0+1}}^{+\infty} dU_{g_0+1-j}^- = \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Delta_{g_0+1-j}^-, \end{aligned}$$

где $\Delta_j^- = 2 \int_{s_{2g_0+1}}^{+\infty} dU_j^-.$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{e} + \Delta^- \\ \mathbf{e} - \mathbf{M}_{g_0} \Delta^- \end{pmatrix} \text{ и } \mathbf{S}^t \Delta = \Delta \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \Delta^- \end{pmatrix}.$$

Заметим также, что выполняются равенства: $\tilde{\Delta}^- = \Delta^- + \mathbf{e}$ и $R_0 = R_0^2$. Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^t \mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t) &= \mathbf{S}^t \left(n\Delta + \mathbf{V}^1 t + \mathbf{U}(P_\infty^\pm) + \mathbf{Z} \right) = \\ &= n \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \Delta^- \end{pmatrix} + \frac{i}{2} \begin{pmatrix} \mathbf{W}^1 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} t + \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_1^\pm \\ \mathbf{Z}_2^\pm \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Z}_1^\pm \\ \mathbf{Z}_2^\pm \end{pmatrix} = \mathbf{S}^t (\mathbf{U}(P_\infty^\pm) + \mathbf{Z}).$$

Из теоремы о редукции многомерной тэта-функции Римана (см., например, [14]) и соотношения (14) вытекает следующее равенство:

$$\begin{aligned} \Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t)) &= \\ &= \sum_{\mathbf{m} \in \mathbb{Z}^g} \exp \left\{ \pi i \mathbf{m}^t \mathbf{B} \mathbf{m} + 2\pi i \mathbf{m}^t (\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t)) \right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{\mathbf{k} \in \mathbb{Z}^g(\mathbf{S})} \sum_{\mathbf{n} \in \mathbb{Z}^g} \exp \left\{ \pi i (\mathbf{S} \mathbf{n} + \mathbf{k})^t \mathbf{B} (\mathbf{S} \mathbf{n} + \mathbf{k}) + \right. \\ &\quad \left. + 2\pi i (\mathbf{S} \mathbf{n} + \mathbf{k})^t (\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t)) \right\} = \\ &= \sum_{\mathbf{k} \in \mathbb{Z}^g(\mathbf{S})} \sum_{\mathbf{n} \in \mathbb{Z}^g} \exp \left\{ \pi i (\mathbf{n} + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{k}))^t \mathbf{S}^t \mathbf{B} \mathbf{S} (\mathbf{n} + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{k})) + \right. \\ &\quad \left. + 2\pi i (\mathbf{n} + \boldsymbol{\eta}(\mathbf{k}))^t (\mathbf{S}^t \mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t)) \right\}. \end{aligned}$$

Переходя от рядов к тэта-функциям, имеем:

$$\begin{aligned} \Theta(\mathbf{A}(n, P_\infty^\pm, t)) &= \sum_{\mathbf{k} \in \mathbb{Z}^g(\mathbf{S})} \Theta[\boldsymbol{\eta}^+(\mathbf{k}); \mathbf{0}] \left(\mathbf{A}^+(n, t) \mid \mathbf{B}^+ \right) \times \\ &\quad \times \Theta[\boldsymbol{\eta}^-(\mathbf{k}); \mathbf{0}] \left(\mathbf{A}^-(n) \mid 2\mathbf{B}^- \right), \end{aligned}$$

где

$$\mathbf{A}^+(n, t) = \frac{i}{2} \mathbf{W}^1 t + n\mathbf{e} + \mathbf{Z}_1^\pm, \quad \mathbf{A}^-(n) = n\Delta^- + \mathbf{Z}_2^\pm.$$

Здесь сумма $\mathbf{k} \in \mathbb{Z}^g(\mathbf{S})$ означает суммирование по $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{k}) \in \frac{1}{2} \mathbb{Z}^g$, где

$$\boldsymbol{\eta}^-(\mathbf{k}) = \boldsymbol{\eta}^+(\mathbf{k}), \quad \boldsymbol{\eta}_j^+(\mathbf{k}) \in \{0; 1/2\}, \quad j = 1, \dots, g_0.$$

Поскольку все тэта-функции

$$\Theta[\boldsymbol{\eta}^+(\mathbf{k}); \mathbf{0}] \left(\mathbf{A}^+(n, t) \mid \mathbf{B}^+ \right)$$

являются периодическими по t функциям и выполняется условие $R_1=0$, то решение (5) будет периодическим по t .

Заключительные замечания

Из приведенных в настоящей работе расчетов следует, при данном выборе спектральной кривой Γ и начальной фазы Z конечнозонные решения (5) будут вещественными и периодическими по t . Заметим, что формула двухзонного решения, полученная в работе [13], хорошо согласуется с результатами настоящей работы. Рассматривая последовательности спектральных кривых, ассоциированных с конечнозонными эллиптическими потенциалами Дарбу – Трейбича – Вердые, можно, используя результаты данной работы, строить последовательности периодических по t конечнозонных решений цепочки Toda.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Toda M. Vibration of a chain with nonlinear interaction // J. phys. soc. Japan. 1967. Vol. 22, № 2. P. 431–436.
2. Toda M. Waves in nonlinear lattice // Progr. theor. phys. suppl. 1970. Vol. 45. P. 174–200.
3. Flaschka H. Toda lattice. I // Phys. rev. B. 1974. Vol. 9. P. 1924–1925.

4. *Flaschka H.* Toda lattice. II // *Progr. theor. phys.* 1974. Vol. 51. P. 704–716.
5. *Манакос С. В.* О полной интегрируемости и стохастизации в дискретных динамических системах // *ЖЭТФ.* 1974. Т. 67, № 2. С. 543–555.
6. *Кас М., van Moerbeke P.* A complete solution of the periodic Toda problem // *Proc. nat. acad. sci. USA.* 1975. Vol. 72, № 8. P. 2879–2880.
7. *Kuijlaars A. B. J.* On the finite-gap ansatz in the continuum limit of the Toda lattice // *Duke math. j.* 2000. Vol. 104, № 3. P. 433–462.
8. *Damianou P. A., Fernandes R. L.* From the Toda lattice to the Volterra lattice and back // *Rep. math. phys.* 2002. Vol. 50, № 3. P. 361–378.
9. *Кричевер И. М.* Алгебраические кривые и нелинейные разностные уравнения // *УМН.* 1978. Т. 33, № 4. С. 215–216.
10. *Кричевер И. М.* Нелинейные уравнения и эллиптические кривые // *Итоги науки и техн. Сер.: Современ. проблемы мат.* 1983. Т. 23. С. 79–136.
11. *Krichever I., Vaninsky K. L.* The periodic and open Toda lattice. Preprint. arXiv:hep-th/0010184. 2000. 23 p.
12. *Algebro-geometrical approach to nonlinear evolution equations.* Springer Ser. / E. D. Belokolos [et al.]. *Nonlinear Dynamics*, Springer, 1994. 337 p.
13. *Матвеев В. Б., Смирнов А. О.* Метод Дубровина и цепочка Тода // *Алгебра и анализ.* 2022. Т. 34, № 6. С. 170–196.
14. *Матвеев В. Б., Смирнов А. О.* Эллиптические солитоны и «странные волны» // *Алгебра и анализ.* 2021. Т. 33, № 3. С. 129–168.
15. *Дубровин Б. А., Тэта-функции и нелинейные уравнения* // *УМН.* 1981. Т. 36, № 2. С. 11–80.
16. *Darboux G.,* Sur une equation linéaire // *Comptes rendus.* 1882. Vol. XCIV, № 25. P. 1645–1648.
17. *De Sparre C^{te}.* Sur l'équation ... // *Acta mathematica.* 1883. Vol. 3. P. 105–140; 289–321.
18. *Verdier J.-L.* New elliptic solitons // *Algebraic analysis.* 1988. Vol. 2. P. 901–910.
19. *Treibich A.* Tangential polynomials and elliptic solitons // *Duke math. j.* 1989. Vol. 59, № 3. P. 611–627.
20. *Treibich A., Verdier J.-L.* Revêtements exceptionnels et sommes de 4 nombres triangulaires // *C. R. Acad. sci. paris. Sér. I: Math.* 1990. Vol. 311, № 1. P. 51–54.
21. *Белококос Е. Д., Энольский В. З.,* Изоспектральные деформации эллиптических потенциалов // *УМН.* 1989. Т. 44, № 5. С. 155–156.
22. *Belokolos E. D., Enol'skii V. Z.* Reduction of theta functions and elliptic finite-gap potentials // *Acta appl. math.* 1994. Vol. 36. P. 87–117.
23. *Smirnov A. O.* Finite-gap elliptic solutions of the KdV equation // *Acta appl. math.* 1994. Vol. 36. P. 125–166.
24. *Gesztesy F., Weikard R.* Treibich – Verdier potentials and the stationary (m)KdV hierarchy // *Math. z.* 1995. Vol. 219, № 3. P. 451–476.
25. *Smirnov A. O.* Elliptic solitons and Heun's equation // *CRM proc. and lect. notes.* 2002. Vol. 32. P. 287–305.
26. *Takemura K.* The Heun equation and the Calogero – Moser – Sutherland system I: The Bethe ansatz method // *Commun. math. phys.* 2003. Vol. 235. P. 467–494.
27. *Ахиезер Н. И.* Элементы теории эллиптических функций. М.: Наука, 1970. 291 с.
28. *Абрамовиц М., Стиган И. А.* Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

REFERENCES

1. Toda M. Vibration of a chain with nonlinear interaction. *J. phys. soc. Japan.* 1967;22(2):431–436.
2. Toda M., Waves in nonlinear lattice. *Progr. theor. phys. suppl.* 1970;45:174–200.
3. Flaschka H. Toda lattice. I. *Phys. rev. B.* 1974;9:1924–1925.
4. Flaschka H. Toda lattice. II. *Progr. theor. phys.* 1974;51:704–716.
5. Manakov S. V. Complete integrability and stochastization of discrete dynamical systems. *Sov. phys. JETP.* 1974;67(2):543–555.
6. Кас М., van Moerbeke P. A complete solution of the periodic Toda problem. *Proc. nat. acad. sci. USA.* 1975;72(8):2879–2880.
7. Kuijlaars A. B. J. On the finite-gap ansatz in the continuum limit of the Toda lattice. *Duke math. j.* 2000;104(3):433–462.
8. Damianou P. A., Fernandes R. L. From the Toda lattice to the Volterra lattice and back. *Rep. math. phys.* 2002;50(3):361–378.
9. Krichever I. M. Algebraic curves and non-linear difference equations. *Russ. math. surv.* 1978;33(4):255–256.
10. Krichever I. M. Nonlinear equations and elliptic curves. *J. sov. math.* 1985;28:51–90.

11. Krichever I., Vaninsky K. L. The periodic and open Toda lattice. Preprint. arXiv:hep-th/0010184. 2000. 23 p.
12. Belokolos E. D., Bobenko A. I., Enol'skii V. Z., Its A. R., Matveev V. B. Algebro-geometrical approach to nonlinear evolution equations. Springer Ser. Nonlinear Dynamics, Springer; 1994. 337 p.
13. Matveev V. B., Smirnov A. O. Dubrovin method and the Toda chain. St. Petersburg math. j. 2023;34(6):1019–1037.
14. Matveev V. B., Smirnov A. O. Elliptic solitons and “freak waves”. St. Petersburg math. j. 2022;33(3):523–551.
15. Dubrovin B. A. Theta functions and non-linear equations. Russ. math. surv. 1981;36(2):11–92.
16. Darboux G. Sur une equation linéaire. Comptes rendus. 1882;XCIV(25):1645–1648.
17. De Sparre C^{te}. Sur l'equation... Acta mathematica. 1883;3:105–140; 289–321.
18. Verdier J.-L. New elliptic solitons // Algebraic analysis. 1988;2:901–910.
19. Treibich A. Tangential polynomials and elliptic solitons. Duke math. j. 1989;59(3):611–627.
20. Treibich A., Verdier J.-L. Revêtements exceptionnels et sommes de 4 nombres triangulaires. C. R. acad. sci. Paris. Sér. I: Math. 1990;311(1):51–54.
21. Belokolos E. D., Enol'skii V. Z. Isospectral deformations of elliptic potentials. Russ. math. surv. 1989;44(5):191–193.
22. Belokolos E. D., Enol'skii V. Z. Reduction of theta functions and elliptic finite-gap potentials. Acta appl. math. 1994;36:87–117.
23. Smirnov A. O. Finite-gap elliptic solutions of the KdV equation. Acta appl. math. 1994;36:125–166.
24. Gesztesy F., Weikard R. Treibich – Verdier potentials and the stationary (m)KdV hierarchy. Math. z. 1995;219(3):451–476.
25. Smirnov A. O. Elliptic solitons and Heun's equation. CRM proc. and lect. notes. 2002;32:287–305.
26. Takemura K. The Heun equation and the Calogero – Moser – Sutherland system I: The Bethe ansatz method. Commun. math. phys. 2003;235:467–494.
27. Akhiezer N. I. Elements of the theory of elliptic functions. Providence, RI, American Mathematical Society; 1990. 292 p.
28. Abramowitz M., Stegun I. A. Handbook of mathematical functions with formulae, graphs and mathematical tables. N. Y.: Wiley-Interscience; 1972. 1045 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Смирнов Александр Олегович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – нелинейные динамические системы.

Smirnov Aleksandr O., D. Sc. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – nonlinear dynamical systems.

Поступила в редакцию 07.10.2024

Поступила после рецензирования 08.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

Received 07.10.2024

Revised 08.10.2024

Accepted 10.10.2024

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Щукина Д. С.** Методика прогнозирования потребительской ценности инновации..... 5
- Квас Е. С., Солёный С. В., Кузьменко В. П.** Симуляционное моделирование управления емкостью буфера как ключевой фактор оптимизации производительности роботизированной линии розлива 10
- Наzarevich С. А.** Диссипативность в организационных системах: показатели и проблемы измерения..... 23
- Пашина Е. А., Назаревич С. А.** Эвристические модели в организационном дизайне для проектирования бережливого производства 27
- Сергеев П. А., Солёный С. В.** Отечественные роботы-манипуляторы: анализ готовности производства и перспективы развития..... 31
- Епифанцев К. В.** Векторы импортозамещения как факторы технологической зрелости 37

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

- Майоров Е. Е., Жулега И. А., Новиков А. В.** Инновационное решение в исследовании поверхности сложной геометрической формы сканирующим интерференционным щупом..... 45
- Китаев В. В., Казаков В. И.** Применение методов оптической спектроскопии в задачах идентификации и контроля микропластика..... 51

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Иванов М. Е., Езерский В. В.** Сравнительный анализ применения нейросетевого и нечеткого регуляторов в системе автоматического управления летательного аппарата по углу крена..... 59

CONTENTS

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. PRODUCTION ORGANIZATION

- Shchukina D. S.** Methodology for predicting the consumer value of innovation..... 5
- Kvas E. S., Solyonyj S. V., Kuzmenko V. P.** Simulation modeling of buffer capacity management as a key factor in optimizing the performance of a robotic bottling line..... 10
- Nazarevich S. A.** Dissipativity in organizational systems: indicators and measurement problems 23
- Pashina E. A., Nazarevich S. A.** Heuristic models in organizational design for lean manufacturing design 27
- Sergeev P. A., Solyonyj S. V.** Domestic robotic arms: analysis of production readiness and development prospects 31
- Epifantsev K. V.** Import substitution vectors as factors of technological maturity 37

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

- Maierov E. E., Zhulega I. A., Novikov A. V.** An innovative solution in the study of a complex geometric surface with a scanning interference probe 45
- Kitaev V. V., Kazakov V. I.** Application of optical spectroscopy methods in problems of identification and control of microplastics..... 51

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Ivanov M. E., Ezerskiy V. V.** Comparative analysis of using of neural network and fuzzy logic controllers in the automatical control system of an aircraft by roll angle..... 59

Григорьев Д. В., Бабчинецкий С. Г. Использование компьютерного зрения для верификации движения экструдера 3D-принтера 65

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Крячко А. Ф., Шакин О. В. Датчик на основе интерферометра Маха – Цандера..... 71

Чумакова Н. Ю., Мамонтова А. А. Моделирование механизмов транспортных соединений с помощью временных сетей Петри..... 76

Смирнов А. О. О периодических колебаниях цепочки Toda 87

Grigoriev D. V., Babchinetsky S. G. Using computer vision to verify the movement of a 3D printer extruder 65

**FUNDAMENTAL SCIENCES
AND APPLIED RESEARCH**

Kryachko A. F., Shakin O. V. Sensor on the basis of the Mach – Zehnder interferometer 71

Chumakova N. Yu., Mamontova A. A. Modeling of transport connection mechanisms using temporal Petri nets 76

Smirnov A. O. On periodic oscillations of the Toda chain 87

Требования к порядку представления рукописей для публикации в научном журнале «Инновационное приборостроение»

1. Для публикации в журнале принимаются оригинальные научные материалы, не публиковавшиеся ранее и соответствующие тематической направленности журнала и критериям научного качества, представляющие интерес для научного сообщества. Авторы представляют в редакцию бумажную и электронную версии статьи в формате Microsoft Word (файл «Структура статьи и образец ее оформления» находится на сайте: <https://fs.guap.ru/inps/obr.pdf>). Заключение пишется в повествовательном стиле, не разбивается на пункты. Выводы должны быть лаконичными и точными, состоять из нескольких пронумерованных пунктов. Обычно количество пунктов соответствует количеству поставленных задач.

2. Объем статьи не должен быть менее 12 000 знаков с пробелами (7–8 машинописных страниц) и не должен превышать 40 000 знаков с пробелами (22–23 машинописные страницы).

Распечатка статьи должна быть подписана всеми авторами с указанием даты ее отправки.

3. К рукописи статьи должны прилагаться две рецензии (внутренняя и внешняя), заключения экспертной комиссии и комиссии экспортного контроля, отчет о проверке на наличие заимствований (процент оригинальности статьи должен составлять не менее 80).

4. При оформлении статьи необходимо придерживаться следующей структуры информации, представленной **на русском и английском языках**:

– фамилия, имя и отчество автора(-ов) полностью; ученая степень, ученое звание, почетное звание (если имеются); должность, название учреждения(-ий), в котором выполнена работа; город, где находится учреждение(-ия), страна. Если рукопись подается от нескольких учреждений, их следует пронумеровать надстрочко и так же пронумеровать авторов статьи. Необходимо указать телефоны, адреса электронной почты, ORCID (при наличии) и SPIN-код авторов; одного из авторов следует указать в качестве ответственного за переписку;

– индекс УДК. Помещают в начале статьи на отдельной строке слева;

– заглавие статьи;

– аннотация / Abstract. Объем ограничен 250 словами, использование ссылок и аббревиатур не допускается;

– ключевые слова / Keywords. У статьи может быть от 3 до 15 ключевых слов. Термины-словосочетания считаются одним ключевым словом.

5. В конце статьи размещается список источников / References на русском и английском языках. Список источников и ссылки на них оформляют по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографические записи в перечне нумеруют и располагают в порядке цитирования источников в тексте статьи. References оформляют согласно стилю Vancouver (файл «Основные правила оформления References в стиле Vancouver» расположен на сайте: <https://fs.guap.ru/inps/vancouver.pdf>).

Краткие технические требования к оформлению статьи

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и список источников) не должен превышать 22–23 страниц машинописного текста формата А4, набранных на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 14, поля не менее 2 см.

Простые **формулы** следует набирать в Word, сложные – с помощью редактора MathType или Equation. В десятичных дробях ставятся запятые. Для набора одной формулы не используйте два редактора одновременно. При наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой. Номер формулы (если он есть) набирается в тексте справа от формулы в скобках, не в формульном редакторе, не в таблице. Нумеруются те формулы, на которые в тексте имеются ссылки. При нумерации формул рекомендуется пользоваться десятичной системой.

При наборе формулы используйте только настройки по умолчанию; никогда не пользуйтесь вкладкой Size, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = – ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» – «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что латинские набираются светлым курсивом, русские и греческие – светлым прямым, векторы и матрицы – прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации:

– рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, они должны быть выполнены в векторных программах: Visio (*.vsd, *.vsdx); Adobe Illustrator (*.ai); Coreldraw (*.cdr, версия не выше 15); Excel (*.xls); Word (*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

– фотографии и скриншоты – в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Графические материалы (рисунки, схемы, иллюстрации) должны иметь последовательные порядковые номера, подписанные на русском и английском языках (Рис. 1 / Fig. 1), обязательные ссылки в тексте. Условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном тексте статьи или подрисуночной подписи.

Таблицы должны иметь последовательные порядковые номера, названия на русском и английском языках (Таблица 1 / Table 1), ссылки в тексте. Для всех показателей в таблице необходимо указать единицы измерений по СИ, ГОСТ 8.417-2002.

Полный перечень технических требований расположен на сайте: https://fs.guap.ru/inps/tech_tr.pdf.

Рукописи, не соответствующие указанным требованиям, не рассматриваются

**Автор несет полную ответственность за точность и достоверность данных, приведенных в рукописи статьи,
присылаемой в редакцию журнала**