



ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 3, № 2 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 3, no. 2 • 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

Executive Secretary

V. A. Tushavin,
D. Sc. in Technical Sciences

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. A. Tushavin, D. Sc.
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 27.04.2024. Signed for printing: 02.05.2024. 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: 10.31799/2949-0693-2024-2

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

Ответственный секретарь

В. А. Тушавин,
доктор технических наук

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. А. Тушавин, д-р техн. наук
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 27.04.2024. Дата выхода в свет: 02.05.2024. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 11,6. Усл. печ. л. 11. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 143.

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.

Численное моделирование процесса аддитивного производства посредством калибровочной модели методом возрождения упругого слоя

Александр Валерьевич Чабаненко¹

✉ a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-код: 7009-4753

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

Аннотация. Аддитивное производство, или 3D-печать, представляет собой процесс создания трехмерных физических объектов на основе цифровых моделей путем последовательного наращивания материала слой за слоем. Эта статья фокусируется на численном моделировании процесса аддитивного производства калибровочной (тарировочной) модели с использованием специфического подхода – метода возрождения упругого слоя. Метод возрождения упругого слоя – это техника, направленная на минимизацию напряжений и деформаций в процессе аддитивного производства, что особенно важно при создании точных и надежных калибровочных моделей. Метод включает в себя виртуальное восстановление упругих свойств каждого слоя после его нанесения и полимеризации, что позволяет предсказывать и корректировать возможные искажения. Аддитивное производство, или 3D-печать, преобразует производственную индустрию, позволяя создавать сложные формы и структуры, которые были бы невозможны или экономически невыгодны при использовании традиционных методов. Однако, несмотря на обширные возможности, процесс сопровождается рядом трудностей, включая управление внутренними напряжениями и предотвращение деформации изделий. Данные проблемы особенно актуальны при производстве калибровочных моделей, требующих высокой точности.

Ключевые слова: аддитивное производство, моделирование, полимеры, FDM, механические свойства материалов

Для цитирования: Чабаненко А. В. Численное моделирование процесса аддитивного производства посредством калибровочной модели методом возрождения упругого слоя // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 5–10. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-5-10.

Original article

Numerical simulation of the additive manufacturing process by means of a calibration model using the elastic layer regeneration method

Aleksandr V. Chabanenko¹

✉ a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-code: 7009-4753

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

Abstract. Additive manufacturing, or 3D printing, is the process of creating three-dimensional physical objects based on digital models by sequentially building up material layer by layer. This article focuses on numerical modeling of the additive manufacturing process of a calibration model using a specific approach – the elastic layer regeneration method. The elastic layer regeneration method is a technique aimed at minimizing stresses and deformations in the additive manufacturing process, which is especially important when creating accurate and reliable calibration models. The method involves the virtual restoration of the elastic properties of each layer after its application and polymerization, which makes it possible to predict and correct possible distortions. Additive manufacturing, or 3D printing, is transforming the manufacturing industry, allowing the creation of complex shapes and structures that would be impossible or economically unprofitable using traditional methods. However, despite the extensive possibilities, the process is accompanied by a number of challenges, including managing internal stresses and preventing deformation of products. These problems are especially relevant in the production of calibration models that require high accuracy.

Keywords: additive manufacturing, modeling, polymers, FDM, mechanical properties of materials

For citation: Chabanenko A. V. Numerical simulation of the additive manufacturing process by means of a calibration model using the elastic layer regeneration method. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):5–10. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-5-10.

В эпоху цифровой индустриализации аддитивное производство выступает не просто как альтернатива традиционным методам изготовления, но и как ключевой драйвер инноваций в об-

ласти материаловедения, инженерии и производства. Точность и надежность изделий, особенно таких критически важных, как калибровочные модели, остаются в центре внимания исследо-

вателей и инженеров. Применение метода возрождения упругого слоя предлагает новый подход к минимизации искажений и напряжений, возникающих в процессе печати. В последние годы аддитивное производство стало не только новаторским подходом к изготовлению изделий, но и сферой интенсивных исследований, направленных на улучшение его точности и эффективности. Важной задачей в этой области является создание калибровочных моделей, требующих высокой степени точности. В данной статье рассматривается метод возрождения упругого слоя как средство минимизации напряжений и деформаций, возникающих в процессе аддитивного производства [1].

Процесс аддитивного производства включает в себя последовательное наращивание материала слой за слоем. Это приводит к неравномерному распределению температур и возникновению термически индуцированных напряжений из-за различий в охлаждении и сжатии материала. Метод возрождения упругого слоя предполагает моделирование и корректировку этих напряжений посредством учета упругих свойств материала на каждом этапе печати. Метод возрождения упругого слоя описывает процесс, в котором виртуальное восстановление упругих свойств каждого наслоенного материала производится с целью компенсации внутренних напряжений и предотвращения деформации объекта. Этот метод особенно актуален при производстве калибровочных моделей, где требования к точности и стабильности формы изделий особенно высоки, модель включает в себя комплекс уравнений, описывающих упругие, термические и механические свойства материалов. Основное уравнение состояния упругого слоя:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где σ – напряжение; E – модуль упругости материала; ε – деформация, служит стартовой точкой для расчетов.

Тепловые процессы моделируются для определения и контроля распределения температур во время процесса печати, что критически важно для предотвращения термически вызванных деформаций. Алгоритмы оптимизации, используемые в модели, позволяют в реальном времени адаптировать параметры печати для достижения наилучшего качества продукции.

В основе аддитивного производства лежит построение объектов слой за слоем, где каждый новый слой материала взаимодействует с предыдущим, создавая комплексную структуру. Этот про-

цесс сопровождается термическими эффектами, вызванными нагревом и последующим охлаждением материала, что приводит к возникновению внутренних напряжений и потенциальным деформациям изделия. Таким образом, ключевым элементом успешного аддитивного производства является управление этими термическими процессами и их последствиями.

На основе данных, полученных в ходе термического и механического моделирования, производится корректировка параметров печати, таких как скорость нанесения материала, температура экструзии и охлаждения. Это позволяет адаптировать процесс печати под конкретные условия и свойства материала, оптимизируя качество и точность готового изделия [2].

Рассмотрим подход к улучшению качества в аддитивном производстве.

Этап 1: предварительный анализ и подготовка данных.

Определение свойств материала: сбор данных о физических и механических свойствах используемого материала, включая модуль упругости, коэффициент теплового расширения и другие параметры, важные для моделирования.

Геометрическое моделирование: создание точной 3D-модели изделия, учитывая особенности аддитивного производства и требования к калибровочным моделям.

Этап 2: численное моделирование процесса печати.

Моделирование тепловых процессов: расчет тепловых полей во время печати с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для определения оптимальных режимов нагрева и охлаждения.

Анализ напряжений и деформаций: применение МКЭ для выявления потенциальных зон повышенных напряжений и предсказания возможных деформаций.

Оптимизация параметров печати: корректировка скорости печати, температуры экструзии и параметров охлаждения для минимизации внутренних напряжений и деформаций [3].

Этап 3: имитация процесса «возрождения» упругого слоя.

Виртуальное «возрождение» слоев: применение специализированных алгоритмов для моделирования изменения упругих свойств материала слоя после его нанесения и охлаждения.

Динамическая корректировка параметров печати: адаптация параметров печати на каждом слое на основе полученных данных о напряжениях и деформациях для обеспечения равномерного распределения упругих свойств по всему объему изделия.

Этап 4: постпроцессинг и контроль качества.

Очистка и обработка: удаление поддержек, шлифовка и другие постобработки для достижения требуемой поверхностной отделки.

Контроль качества: использование методов неразрушающего контроля (например, компьютерной томографии) для проверки внутренней структуры изделия и подтверждения отсутствия дефектов.

Этап 5: анализ результатов и дальнейшая оптимизация.

Сравнение с контрольными образцами: анализ полученных изделий по сравнению с калибровочными образцами для оценки точности и качества.

Итеративная оптимизация: при необходимости – повторение процесса с учетом полученных результатов для дальнейшего улучшения качества изделий.

Для улучшения качества аддитивного производства с использованием метода возрождения упругого слоя необходим комплексный подход, начиная с предварительного анализа и заканчивая постпроцессингом изделий. В начале процесса осуществляется тщательный сбор данных о физических и механических свойствах используемого материала, включая модуль упругости и коэффициент теплового расширения. Эти данные критически важны для точного моделирования и оптимизации производственных параметров. Далее следует создание детальной 3D-модели изделия, учитывающей особенности аддитивного производства и требования к калибровочным моделям.

Деформация в аддитивном производстве может быть описана с использованием уравнения:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T + \frac{F}{AE},$$

где Δl – изменение длины или смещение объекта; l_0 – исходная длина объекта; α – коэффициент термического расширения материала; ΔT – разница температур; F – приложенная сила; A – площадь поперечного сечения объекта, к которой приложена сила; E – модуль Юнга (модуль упругости) материала.

Следующий шаг включает в себя численное моделирование процесса печати, которое начинается с моделирования тепловых процессов для определения оптимальных условий нагрева и охлаждения. Использование метода конечных элементов позволяет рассчитать тепловые поля во время печати и их влияние на материал. Это сопровождается анализом напряжений и деформаций с выявлением потенциальных проблемных зон и предсказыванием возможных искажений. На основании полученных данных производится корректировка параметров печати, включая скорость, температуру и охлаждение, для минимизации внутренних напряжений.

Нормативная документация и стандарты играют ключевую роль в развитии и стандартизации аддитивного производства, обеспечивая единые требования к качеству, безопасности и совместимости продукции. Они помогают в определении методов тестирования, требований к материалам, процессам печати, постобработке и окончательной

```
>> % Определение параметров модели
numLayers = 10; % Количество слоев
layerThickness = 0.1; % Толщина слоя
layerLength = 5; % Длина слоя
layerWidth = 3; % Ширина слоя

% Подготовка фигуры для визуализации
figure;
hold on; % Удержание текущего графика
axis equal; % Установка одинаковой шкалы
grid on; % Включение сетки
xlabel('Длина');
ylabel('Ширина');
zlabel('Высота');
title('Визуализация аддитивного производства');

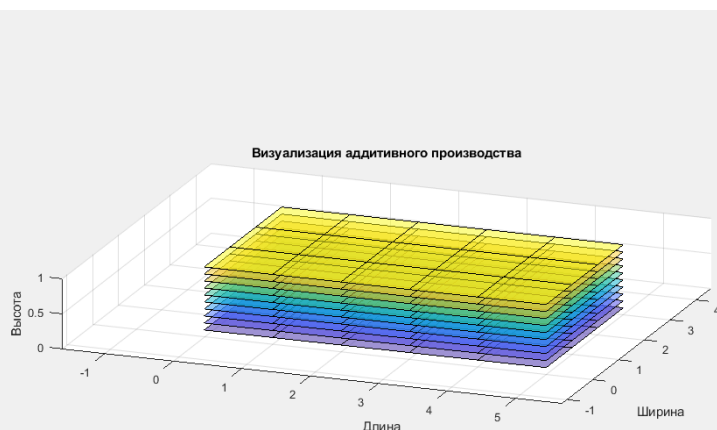
% Цикл построения каждого слоя
for layer = 1:numLayers
    % Высота текущего слоя
    currentHeight = layer * layerThickness;

    % Создание координат для текущего слоя
    [X, Y] = meshgrid(0:layerLength-1, 0:layerWidth-1);
    Z = currentHeight * ones(size(X));

    % Визуализация текущего слоя
    surf(X, Y, Z, 'FaceAlpha', 0.5);

    % Пауза для визуализации добавления слоя
    pause(0.5);
end

% Удержание визуализации открытой
hold off;
>>
```



Variable	Value
currentHeight	1
deformation	1.0000e-03
deformationCoeff...	1.0000e-04
layer	10
layerDeformations	[1.0000e-04, 2.0000e-0...
layerLength	5
layerThickness	0.1000
layerWidth	3
numLayers	10
totalDeformation	0.0055

- Рис. 1. Моделирование процесса наложения слоев в аддитивном производстве
- Fig. 1. Modeling of the layering process in additive manufacturing

проверке качества изделий. В последние годы было разработано несколько ключевых стандартов и документов, направленных на упорядочение практик в сфере аддитивного производства [4].

Международные стандарты, регламентирующие аддитивную печать:

– ISO/ASTM 52900:2015 – «Additive manufacturing – General principles – Terminology» – устанавливает терминологию, которая используется в аддитивном производстве, включая процессы 3D-печати, типы изделий и свойства материалов;

– ASTM F2792 – «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies» – вводит стандартизованную терминологию для технологий аддитивного производства, обеспечивая ясность и единообразие в их описании и классификации;

– ISO/ASTM52915 – «Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)» – определяет формат файла для аддитивного производства, который поддерживает цветную печать и другие спецификации, необходимые для создания сложных изделий;

– ISO/ASTM52921:2013–«Standard Terminology for Additive Manufacturing – Coordinate Systems and Test Methodologies» – устанавливает стандарты для систем координат и методологий тестирования в аддитивном производстве.

Стандарты качества и безопасности:

– ISO 13485 – «Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes» – касается систем управления качеством для производителей медицинских изделий, в том числе и изготавливаемых с помощью аддитивных технологий;

– ISO/ASTM529 – «Additive manufacturing – General principles – Requirements for purchased AM parts» – устанавливает требования к качеству и спецификациям для деталей, заказанных у производителей аддитивных изделий, обеспечивая соответствие продукции ожиданиям заказчика;

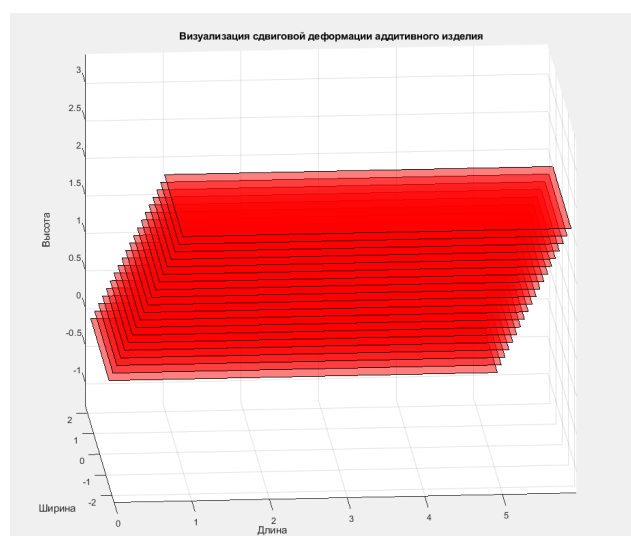
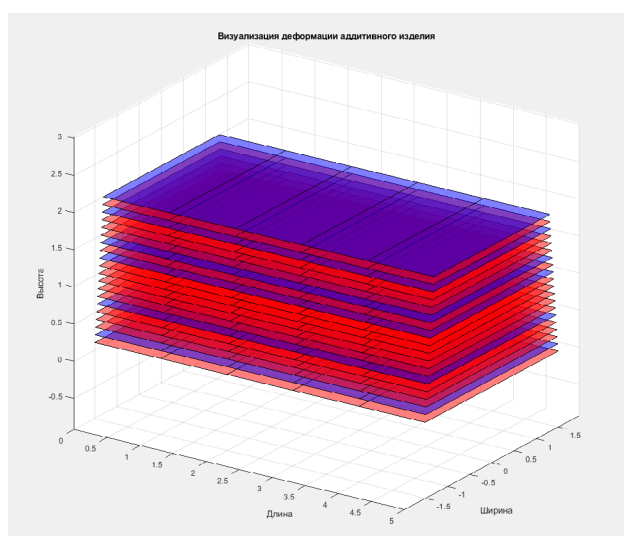
– ASTM F3184-16 – «Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion» – описывает спецификации для производства деталей из нержавеющей стали методом аддитивного производства с использованием порошковой литографии, обеспечивая стандарты для металлических материалов.

Стандарты по материалам:

ISO/ASTM52904 – «Additive manufacturing – Process characteristics and performance: Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications» – устанавливает методы и практики для обеспечения качества и надежности металлических изделий, произведенных методом порошковой литографии, для критически важных применений;

– ASTM F3049-14 – «Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes» – предоставляет руководство по характеристике свойств металлических порошков, используемых в аддитивном производстве, включая методы оценки и контроля качества порошка.

Для моделирования поведения детали, изготовленной методом аддитивного производства, мы можем использовать программу MatLab и некоторые библиотеки (рис. 2), в качестве аддитив-



- Рис. 2. Модель смещения и деформации слоя на сдвиг
- Fig. 2. The model of displacement and deformation of the layer by shear



- *Рис. 3. Аддитивная установка, использующая три степени свободы*
- *Fig. 3. Additive installation using three degrees of freedom*

ной установки взят отечественный 3D-принтер Picasso designer pro (рис. 3).

```
% Параметры модели
numLayers = 20; % Количество слоев
baseLayerLength = 5; % Базовая длина слоя
baseLayerWidth = 3; % Базовая ширина слоя
layerHeight = 0.1; % Высота каждого слоя
shearRate = 0.05; % Скорость сдвига (смещение
каждого нового слоя по X)
% Инициализация фигуры для визуализации
figure;
hold on;
axis equal;
grid on;
xlabel('Длина');
ylabel('Ширина');
zlabel('Высота');
title('Визуализация сдвиговой деформации ад-
дитивного изделия');
% Цикл по слоям
for layer = 1:numLayers
    % Рассчитываем смещение для текущего слоя
    shearOffset = (layer - 1) * shearRate;
    % Генерация координат для верхней грани слоя
с учетом сдвига
    [X, Y] = meshgrid(linspace(0, baseLayerLength,
2) + shearOffset, ...
    linspace(-baseLayerWidth/2, baseLayerWidth/2, 2));
```

```
Z = layerHeight * ones(size(X)) * layer;
% Визуализация текущего слоя
surf(X, Y, Z, 'FaceAlpha', 0.5, 'FaceColor',
'r');
% Пауза для наблюдения построения
pause(0.2);
end
```

Применение калибровочной модели методом возрождения упругого слоя может помочь в предсказании и контроле деформаций и напряжений, возникающих в процессе аддитивного производства. Это позволяет снизить вероятность возникновения дефектов, оптимизировать параметры печати и, как следствие, повысить качество готовых изделий. Моделирование выступает не просто как инструмент анализа, но и как направляющий элемент для научных исследований и инженерных разработок в области аддитивных технологий.

Заключение

Математическое моделирование процесса аддитивного производства является важным подготовительным этапом при определении стратегии производства детали. Важность этого этапа, в первую очередь, обоснована тем, что в процессе производства возможно искажение формы объекта, связанное с особенностями технологии, которое может привести к выходу за границы допусков на размеры или смещению функциональных областей.

Данный пример иллюстрирует работу технологии упрощенной симуляции аддитивного производства, а получаемые в процессе расчета результаты демонстрируют влияние процесса производства на итоговую форму детали. Использование программного обеспечения для симуляции дает возможность оптимизировать параметры печати, такие как скорость подачи материала, температура экструзии и охлаждения, а также стратегии построения слоев. Это в конечном итоге приводит к улучшению качества изготовленных деталей, снижению отходов и экономии времени на доработку.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Чабаненко А. В. Управление качеством корпусных элементов РЭА // Стандарты и качество. 2018. № 2. С. 90–94.*
2. *Чабаненко А. В. Метрологическое обеспечение изделий аддитивного производства // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. ст. V Междунар. форума / под ред. В. В. Окрепилова. СПб., 2023. С. 151–152.*

3. Комаров Т. И., Пузырева В. С., Чабаненко А. В. Разработка модели совершенствования системы контроля качества частиц порошка красящего пигмента // Известия Самар. науч. центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 3 (113). С. 16–25.
4. Рассыхаева М. Д., Чабаненко А. В. Математическое моделирование физически релевантного поведения композиционных материалов // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. Четвертой Всерос. науч. конф. СПб., 2023. С. 100–102.

REFERENCES

1. Chabanenko A. V. Quality management of housing elements of REA Standards and quality. 2018;(2):90–94. (In Russ.).
2. Chabanenko A. V. Metrological support of additive manufacturing products. Metrological support of innovative technologies: Collection of articles of the V International forum; eds by V. V. Okrepilov. SPb.; 2023, pp. 151–152. (In Russ.).
3. Komarov T. I., Puzyreva V. S., Chabanenko A. V. Development of a model for improving the quality control system of particles of coloring pigment powder. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2023;25(3(113)):16–25. (In Russ.).
4. Rassyhaeva M. D., Chabanenko A. V. Mathematical modeling of the physical relevant behavior of composite materials. Modeling and situational quality management of complex systems: Collection of reports of the Fourth All-Russian scientific conference. SPb.; 2023, pp. 100–102. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Чабаненко Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – аддитивные технологии, интеллектуальные системы управления качеством.

Поступила в редакцию 20.03.2024

Поступила после рецензирования 25.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Chabanenko Aleksandr V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – additive technologies, intelligent quality management systems.

Received 20.03.2024

Revised 25.03.2024

Accepted 04.04.2024

Научная статья
УДК 65.011.48

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-11-17

Применение искусственных нейронных сетей в управлении результативностью технического документооборота

Максим Викторович Иванов¹

umka62@list.ru, SPIN-код: 6209-9122

Владимир Александрович Тушавин¹

✉ tushavin@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4989-7456, SPIN-код: 8747-4876

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

Аннотация. Предлагается подход к улучшению процессов согласования технической документации с учетом ограничений системы менеджмента качества наукоемкого производства. Рассмотрен и проанализирован зарубежный опыт решения задач классификации документов с помощью искусственных нейронных сетей. Предложена улучшенная модель маршрута согласования технической документации в среде автоматизированной системы предприятия, не противоречащая требованиям системы менеджмента качества организации и позволяющая улучшить качество процессов согласования технической документации наукоемкого производства.

Ключевые слова: система, искусственная нейронная сеть, технический документооборот, несоответствие, техническая документация, качество, модернизация, улучшение, наукоемкое производство, организация, система менеджмента качества

Для цитирования: Иванов М. В., Тушавин В. А. Применение искусственных нейронных сетей в управлении результативностью технического документооборота // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 11–17. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-11-17.

Original article

Application of artificial neural networks in performance management of technical document management

Maksim V. Ivanov¹

umka62@list.ru, SPIN-code: 6209-9122

Vladimir A. Tushavin¹

✉ tushavin@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4989-7456, SPIN-code: 8747-4876

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

Abstract. An approach to improving the processes of technical documentation approval taking into account the limitations of the quality management system of knowledge-intensive production is proposed. Foreign experience of solving problems of document classification using artificial neural networks is considered and analyzed. The improved model of the route of technical documentation coordination in the environment of the automated system of the enterprise, not contradicting the requirements of the quality management system of the organization and allowing to improve the quality of the processes of coordination of technical documentation of knowledge-intensive production is offered.

Keywords: system, artificial neural network, engineering document flow, nonconformity, engineering documentation, quality, modernization, improvement, high-technology production, organization, quality management system

For citation: Ivanov M. V., Tushavin V. A. Application of artificial neural networks in performance management of technical document management. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):11–17. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-11-17.

Введение

Инженерные процессы наукоемкого производства содержат в себе накопленные знания организации (организационное научение) и состоят из определенной последовательности действий. В процессе осуществления инженерной деятельности участниками процесса генериру-

ется большой объем данных и знаний, который формализуется в виде документов различного типа. Накопление знаний в организации приводит к тому, что инженеры тратят более 50 % рабочего времени на поиск необходимых им для работы документов, даже с учетом внедренной на предприятии системы электронного документооборота (ЭДО) [1]. Применяя принцип Парето к электрон-

ному документообороту, современные практики делают вывод, что только около 20 % инженерной информации можно извлечь из ЭДО, содержащей только числовые данные, а остальные 80 % остаются скрытыми в самих документах [2–4]. В работе R. Feldman et al. [5] также утверждается, что 80 % явных знаний предприятия находится внутри технической документации. Развитие конструкторско-технологической подготовки производства (АКТТП) приводит к лавинообразному росту электронных документов, порождающих хаос за счет неэффективного хранения и маршрутизации.

Научное производство характеризуется процессами осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на всех стадиях жизненного цикла продукции. В данных процессах существенную роль играет снабжение производства информацией об изделии, отраженной в технической документации (ТД), образующей систему технического документооборота (ТДО). Согласно ГОСТ 2.103, в жизненном цикле изделия ТДО включает в себя разработку рабочей технической документации с помощью автоматизированной системы управления жизненным циклом изделия, изготовление и испытание опытных образцов изделий, корректировку ТД по результатам испытаний в соответствии с требованиями заказчика.

Известно, что при правильно организованной системе классификации технических документов поиск и использование документов специалистами значительно упрощаются. Однако, как было сказано выше, лавинообразный рост количества документов при современном производстве приводит к значительному увеличению трудоемкости. Создание рациональной таксономии документов, их индексация, идентификация, классификация и присвоение поисковых меток в современных условиях требуют создания дополнительных штатных единиц для решения этих задач. Проблема усугубляется комплексностью и технической сложностью данных документов, что приводит к невозможности найма низкоквалифицированного персонала для данной работы в силу отсутствия у него необходимых компетенций для результативной классификации документов. Для специалистов же высокой квалификации данная рутинная работа не представляет интереса. Осуществляемое на части предприятий решение данной проблемы посредством найма технически грамотных пенсионеров содержит достаточно высокие кадровые риски. Исходя из изложенного, представляется целесообразным использовать для решения этой задачи современные средства автоматизации.

Анализ зарубежных источников показывает, что за рубежом активно изучается использование алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации технической документации, например, в бизнес-процессах управления знаниями организации [6]. Как показали результаты этих исследований, классические алгоритмы, например, метод k -ближайших соседей (KNN) и метод опорных векторов (SVM), имеют проблему с масштабируемостью и не позволяют решить подобную задачу в масштабах крупного производства. Относительно недавно разработанные новые алгоритмы работы с естественным языком, основанные на глубоком машинном обучении, демонстрируют возможность решения данной задачи для значительных объемов технической документации [7]. Описанные модели обучались на текстографических документах с фокусом на содержательной части для разработки классификаторов на основе современных методов обработки естественного языка (NLP). Однако следует отметить, что, несмотря на существующий значительный научно-технологический прорыв в данной области, применение результатов данных классифицирующих моделей остается недостаточно надежным. Например, в статье S. Li et al. [8] содержится информация, что предложенная исследователями методика, использующая сверточную нейронную сеть, имеет точность всего 73 % на наборе данных из 2 млн патентных документов.

С другой стороны, решение аналогичной задачи классификации документов в сети Интернет поисковыми системами на основе существующего фреймворка алгоритмов NLP демонстрирует значительный прогресс. Традиционные подходы к классификации в данном случае представляют корпус текста в виде отдельных разреженных лексических признаков, таких как частота терминов и обратная частота документов (TF-IDF) и N -граммы. На втором этапе эти алгоритмы используют линейную модель (например, логистическую регрессию) или ядерные методы (например, SVM у *Google*), основанные на этих представлениях [9, 10]. Развитие высокопроизводительных вычислений на основе нейронных процессоров значительно снизило количество машино-часов, необходимых для глубокого обучения и сквозного обучения. Здесь следует отметить работы зарубежных исследователей по CNN [11], RNN [12], капсульные нейронные сети [13] и трансформеры [14]. В частности, в работе A. Joulin et al. [15] исследуется достаточно простая, но эффективная модель FastText, которая рассматривает текст документа как совокупность слов и затем пропускает их через один или несколько многослойных

перцептронов для последующей классификации. S. Lai et al. [16] предложили рекуррентную конволюционную нейронную сеть (RCNN) для классификации текстов без использования разработанных человеком признаков. В этой модели применяется рекуррентная структура для извлечения дальних контекстных зависимостей при обучении представлений. В работе Z. Yang et al. [17] рассматривается иерархическая сеть внимания. В этой модели иерархическая структура отражает естественную иерархическую структуру документов, а механизмы внимания применяются как на уровне слов, так и на уровне предложений, что позволяет ей дифференцировать внимание к менее и более важному контенту при обучении представлениям документов. Однако эти модели используют только данные естественного языка в качестве представления документов и обычно обучаются на общем корпусе документов, который часто включает в себя широкий спектр неинженерных тем.

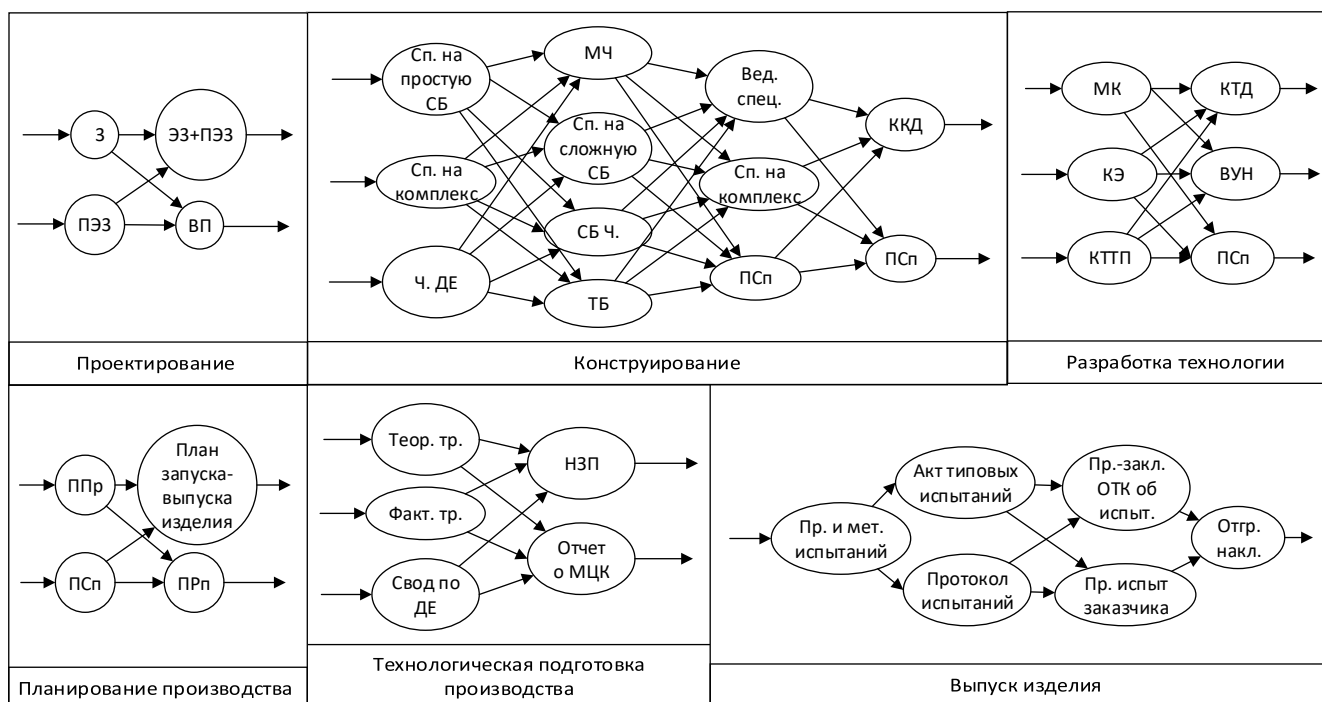
Однако в инженерной области уже существует несколько исследований, связанных с классификацией технических документов. Например, С. Н. Caldas и L. Soibelman [18] описали метод классификации документов, основанный на иерархической структуре из Института строительных спецификаций. Они использовали TF-IDF для представления текста и обучили SVM-классификатор для классификации документов.

Эксперименты проводились на наборе данных из 3030 документов. Аналогично S. Chagheri et al. [19] использовали алгоритм SVM для обучения классификатора, который помог компании *Continew Co.* классифицировать и управлять технической документацией. Их модель была обучена и оценена на небольшом наборе из 800 документов. Эти первые исследования использовали традиционные немасштабируемые методы машинного обучения и были проиллюстрированы небольшими наборами документов.

Методика применения нейронных сетей в ТДО

Искусственные нейронные сети (ИНС) – один из инструментов реализации цифрового производства в рамках концепции «Индустрия 4.0», особенностью которых является наличие обратной связи, оказывающей непосредственное влияние на приходящие извне сигналы.

Цель ТДО состоит в преобразовании информации об изделии из одних видов в другие, поэтому задача обучения ИНС-подмоделей сводится к классификации входных данных. Для этих целей в качестве архитектуры ИНС используется многослойный перцептрон [20]. Обучение осуществляется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [21] для имитации эф-



• Рис. 1. Шесть независимых ИНС-подмоделей различных этапов ТДО
 • Fig. 1. Six independent ANN submodels of various stages of engineering document flow

фекта от постоянного возникновения несоответствий в процессе производства изделий.

Таким образом, в рамках проведенного исследования была создана имитационная модель ТДО наукоемкого производства [22], состоящая из шести независимых подмоделей (рис. 1).

Следуя данным принципам, построена ОИНС-модель (объединенная искусственная нейронная сеть), особенностью которой является использование одних и тех же входных данных для каждой ИНС-подмодели для гарантированной генерации шума на дополнительных входах ИНС (рис. 2).

Полученная ОИНС является работоспособной и позволяет получить верные результаты обработки входных сигналов благодаря непрерывной нейросетевой структуре, не препятствующей корректному обучению, позволяющей подавлять ошибки в распространяющихся сигналах между ИНС-подмоделями. При значении коэффициента скорости обучения 0,07 и количестве эпох обучения 500 точность ОИНС модели составляет 99 %, полнота – 99 %.

Результаты оценки F-меры свидетельствуют о проблемах обработки данных об изделии на этапе технологической подготовки производства (таблица).

Перспективным решением оказалась цифровизация потоков обмена информацией об изде-

- Значения F-меры ИНС-подмоделей различных этапов ТДО

- F-measure values of ANN submodels of various stages of engineering document flow

ИНС-подмодель	F
Проектирование	0,51
Конструирование	0,59
Разработка технологии	0,37
Планирование производства	0,58
Технологическая подготовка производства	0,15
Выпуск изделия	0,99

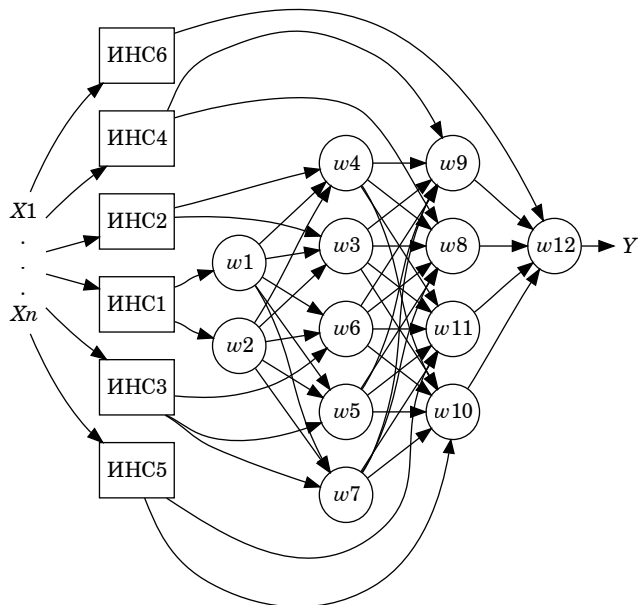
лии между проектным и производственным циклом с последующей маршрутизацией, что также увеличит их оперативность. Исходя из изложенного, была разработана методика создания структурной модели маршрута согласования ТД с применением элементов теории ИНС, заключающаяся в преобразовании элементов и внутренних связей традиционного маршрута согласования ТД во внутренние связи и элементы замещающей структурной модели соответственно. Ее применение позволило улучшить маршрут, уменьшив количество статусов и предоставив возможность параллельного согласования документации между лицами, участвующими в разработке [18].

Сбор статистических данных, связанных с утвержденными и созданными в среде автоматизированной системы организации технического документооборота, осуществляется с помощью специально разработанного для этих целей инструмента [22].

Заключение

Апробация полученной модели на реальном ТДО наукоемкого производства показала улучшение показателей результативности процессов.

Внедрение модернизированного маршрута ТДО позволило сократить среднюю продолжительность согласования и утверждения конструкторской, технологической и сквозной технологической документации, соответственно, на 20, 32 и 41 %, что положительно влияет на предупреждение рисков, связанных с непредвиденными задержками в процессе согласования и утверждения ТД. Значение комплексного показателя качества свидетельствует об общем улучшении маршрута ТДО по сравнению с его предыдущим состоянием на 17 %.



• Рис. 2. ОИНС с дополнительными шумовыми входами на каждом слое

• Fig. 2. CANN with additional noise inputs on each layer

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ulrich K. T., Eppinger S. D., Yang M. C. Product design and development. 7th ed. McGraw-Hill Education, 2020.
2. Liu A. A multi-agent-based architecture for enterprise customer and supplier cooperation context-aware information systems // Proceedings of International conference on autonomic and autonomous systems. 2007. P. 58.
3. Tseng F. S. C. Design of a multi-dimensional query expression for document warehouses // Inf. sci. 2005. Vol. 174, № 1–2. P. 55–79.
4. Tseng F. S. C., Chou A. Y. H. The concept of document warehousing for multi-dimensional modeling of textual-based business intelligence // Decis. support syst. 2006. Vol. 42, № 2. P. 727–744.
5. The text mining handbook: advanced approaches in analyzing unstructured data / R. Feldman [et al.]. Cambridge university press, 2007.
6. Caldas C. H., Soibelman L. Automating hierarchical document classification for construction management information systems // Autom. constr. 2003. Vol. 12, № 4. P. 395–406.
7. Aristodemou L., Tietze F. The state-of-the-art on Intellectual Property Analytics (IPA): A literature review on artificial intelligence, machine learning and deep learning methods for analysing intellectual property (IP) data // World pat. inf. 2018. Vol. 55. P. 37–51.
8. DeepPatent: patent classification with convolutional neural networks and word embedding / S. Li, J. Hu, Y. Cui, J. Hu // Scientometrics. 2018. Vol. 117, № 2. P. 721–744.
9. Wang S., Manning C. D. Baselines and bigrams: Simple, good sentiment and topic classification // Proceedings of the 50th annual meeting of the Association for computational linguistics (ACL). 2012. P. 90–94.
10. Joachims T. Text categorization with Support Vector Machines: Learning with many relevant features // Machine learning: ECML – 98: Lecture notes in computer science. 1998. Vol. 1398. Doi: <https://doi.org/10.1007/BFb0026683>.
11. Learning with many relevant features // Proceedings of the European conference on machine learning (ECML). 1998. P. 137–142.
12. Kalchbrenner N., Grefenstette E., Blunsom P. A convolutional neural network for modelling sentences // The Annual meeting of the Association for computational linguistics (ACL). 2014. P. 655–665.
13. Liu P., Qiu X., Huang X. Recurrent neural network for text classification with multi-task learning // Proceedings of the Twenty fifth International joint conference on artificial intelligence (IJCAI). 2016. P. 2873–2879.
14. Attention is all you need / A. Vaswani [et al.] // in Proceedings of the 31st conference on neural information processing systems (NIPS). 2017. P. 5998–6008.
15. Bag of tricks for efficient text classification / A. Joulin, E. Grave, P. Bojanowski, T. Mikolov // in Proceedings of the 15th conference of the European chapter of the association for computational linguistics (ACL). 2017. P. 427–431.
16. Recurrent convolutional neural networks for text classification / S. Lai, L. Xu, K. Liu, J. Zhao // Proceedings of the Twenty-Ninth conference on artificial intelligence (AAAI). 2015. P. 2267–2273.
17. Hierarchical attention networks for document classification / Z. Yang [et al.] // Proceedings of the 2016 conference of the North American chapter of the Association for computational linguistics: human language technologies (NAACL-HLT). 2016. P. 1480–1489.
18. Caldas C. H., Soibelman L. Automating hierarchical document classification for construction management information systems // Autom. constr. 2003. Vol. 12, № 4. P. 395–406.
19. Technical documents classification / S. Chagheri, C. Roussey, S. Calabretto, C. Dumoulin // Proceedings of the 15th International conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD). 2011. P. 808–812.
20. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain // Psychological review. 1958. Vol. 65, № 6. P. 386.
21. Барцев С. И., Охонин В. А. Адаптивные сети обработки информации. Препринт № 59Б Ин-та физики СО АН СССР. Красноярск: Институт физики СО АН СССР, 1986. 20 с.
22. Иванов М. В. Разработка концепции обобщенной нейронносетевой модели // Известия Самар. науч. центра Российской академии наук. 2019. Т. 21, № 5. С. 11–15.

REFERENCES

1. Ulrich K. T., Eppinger S. D., Yang M. C. Product design and development. 7th ed. McGraw-Hill Education; 2020.
2. Liu A. A multi-agent-based architecture for enterprise customer and supplier cooperation context-aware information systems. Proceedings of International conference on autonomic and autonomous systems. 2007, pp. 58.
3. Tseng F. S. C. Design of a multi-dimensional query expression for document warehouses. Inf. sci. 2005;174(1–2):55–79.

4. Tseng F. S. C., Chou A. Y. H. The concept of document warehousing for multi-dimensional modeling of textual-based business intelligence. *Decis. support syst.* 2006;42(2):727–744.
5. Feldman R. et al. *The text mining handbook: advanced approaches in analyzing unstructured data.* Cambridge university press; 2007.
6. Caldas C. H., Soibelman L. Automating hierarchical document classification for construction management information systems. *Autom. constr.* 2003;12(4):395–406.
7. Aristodemou L., Tietze F. The state-of-the-art on Intellectual Property Analytics (IPA): A literature review on artificial intelligence, machine learning and deep learning methods for analysing intellectual property (IP) data. *World pat. inf.* 2018, vol. 5, pp. 37–51.
8. Li S., Hu J., Cui Y., Hu J. DeepPatent: patent classification with convolutional neural networks and word embedding. *Scientometrics.* 2018;117(2):721–744.
9. Wang S., Manning C. D. Baselines and bigrams: Simple, good sentiment and topic classification. *Proceedings of the 50th annual meeting of the Association for computational linguistics (ACL).* 2012, pp. 90–94.
10. Joachims T. Text categorization with Support Vector Machines: Learning with many relevant features. *Machine learning: ECML – 98: Lecture notes in computer science.* 1998;1398. Doi: <https://doi.org/10.1007/BFb0026683>.
11. Learning with many relevant features. *Proceedings of the European conference on machine learning (ECML).* 1998, pp. 137–142.
12. Kalchbrenner N., Grefenstette E., Blunsom P. A convolutional neural network for modelling sentences. *The Annual meeting of the Association for computational linguistics (ACL).* 2014, pp. 655–665.
13. Liu P., Qiu X., Huang X. Recurrent neural network for text classification with multi-task learning. *Proceedings of the Twenty fifth International joint conference on artificial intelligence (IJCAI).* 2016, pp. 2873–2879.
14. Vaswani A. et al. Attention is all you need. *Proceedings of the 31st conference on neural information processing systems (NIPS).* 2017, pp. 5998–6008.
15. Joulin A., Grave E., Bojanowski P., Mikolov T. Bag of Tricks for efficient text classification. *Proceedings of the 15th conference of the european chapter of the association for computational linguistics (ACL).* 2017, pp. 427–431.
16. Lai S., Xu L., Liu K., Zhao J. Recurrent convolutional neural networks for text classification. in *Proceedings of the Twenty-ninth conference on artificial intelligence (AAAI).* 2015, pp. 2267–2273.
17. Yang Z., Yang D., Dyer C., He X., Smola A., Hovy E. Hierarchical attention networks for document classification. *Proceedings of the 2016 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies (NAACL-HLT).* 2016, pp. 1480–1489.
18. Caldas C. H., Soibelman L. Automating hierarchical document classification for construction management information systems. *Autom. constr.* 2003;12(4):395–406.
19. Chagheri S., Roussey C., Calabretto S., Dumoulin C. Technical documents classification. *Proceedings of the 15th International conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD).* 2011, pp. 808–812.
20. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological review.* 1958;65(6):386.
21. Bartsev S. I., Okhonin V. A. Adaptive information processing networks. Krasnoyarsk: Institute of Physics Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1986, no. 59B. 20 p. (In Russ.).
22. Ivanov M. V. Development of the concept of a generalized artificial neural network model. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2019;5(21):11–15. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Максим Викторович, инженер кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – искусственный интеллект, машинное обучение, имитационное моделирование систем, проблемы организации наукоемкого производства.

Ivanov Maksim V., Engineer at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – artificial intelligence, machine learning, simulation modeling, high-technology organization problems.

Тушавин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством процессов информационного обеспечения наукоемкого производства.

Поступила в редакцию 21.03.2024

Поступила после рецензирования 25.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Tushavin Vladimir A., D. Sc. in Technical Sciences, Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management of information support processes of knowledge-intensive production.

Received 21.03.2024

Revised 25.03.2024

Accepted 04.04.2024

Научная статья
УДК 658.5

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-18-21

Тактика проектирования бережливых производственных систем

Александра Валерьевна Винниченко¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723, SPIN-код: 2578-2770

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

Аннотация. Исследуется проблема адаптации при проектировании бережливых производственных систем на отечественных предприятиях. Описываются фундаментальные стратегии и методы, используемые при разработке систем бережливого производства, на основе которых разрабатывается тактика перехода с традиционных производственных систем на бережливые производственные системы.

Ключевые слова: бережливое производство, традиционная производственная система, бережливая производственная система, элементы бережливого производства

Для цитирования: Винниченко А. В. Тактика проектирования бережливых производственных систем // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 18–21. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-18-21.

Original article

The tactics of designing lean production systems

Alexandra V. Vinnichenko¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723, SPIN-code: 2578-2770

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

Abstract. The article examines the problem of adaptation in the design of lean production systems at domestic enterprises. Describes the fundamental strategies and methods used in the development of lean production systems, based on which tactics for the transition from traditional production systems to lean production systems are developed.

Keywords: lean manufacturing, traditional production system, lean production system, elements of lean manufacturing

For citation: Vinnichenko A. V. The 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.

Введение

В современных условиях, учитывая политико-экономическое положение, отечественные промышленные организации стремятся достичь максимального эффекта при минимальных затратах, что и приводит высший уровень управления организаций к необходимости внедрения философии бережливого производства, которая направлена на формирование производственной среды, полностью отвечающей современным запросам рынка. Бережливое производство приобретает широкую популярность в различных отраслях промышленности благодаря своей способности повышать производительность и снижать затраты.

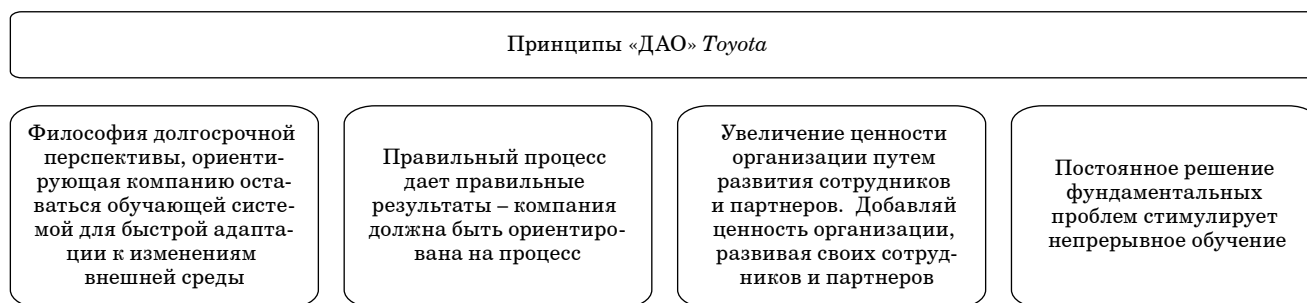
Материал и методы исследования

Процессы внедрения и адаптации элементов бережливого производства не всегда завершают-

ся успешно. Чаще всего проблемой является конфронтация успешно используемых отечественных систем управления на предприятиях и философии бережливого производства. Основные отличия отечественных систем управления, разрабатываемых в период 1950–1980-х гг., от концепции бережливого производства заключаются в подходе к организации производства, ориентации на краткосрочный результат, низкой гибкости и адаптивности, а также слабом вовлечении персонала [1].

Для успешного внедрения и адаптации принципов бережливого производства необходимо использовать принципы «ДАО» Toyota, на основе которых и была сформирована философия бережливого производства. Принципы «ДАО» Toyota представляют собой отправную точку для внедрения бережливого производства, которые можно сгруппировать в четыре категории (рис. 1) [2].

Изучив принципы «ДАО» Toyota, можно определить ключевые аспекты проектирования бережливого производства. Важно помнить, что ес-



• *Рис. 1. Классификация принципов менеджмента «ДАО» Toyota*
 • *Fig. 1. Classification of Toyota «DAO» management principles*

ли ключевые аспекты будут единообразными для различных организаций, то план по проектированию и внедрению бережливых производственных систем будет индивидуальным, учитывающим специфику организаций. Наиболее частые проблемы проектирования бережливых систем – это отсутствие стандартизированного алгоритма, подходящего всем отечественным организациям и учитывающего специфику процессов и производственной среды, также необходимость изменения приработанных методов управления производством и внедрение новых подходов в консервативно настроенных коллективах, что приводит к сопротивлению персонала [3].

Примером последовательности действий для проектирования и внедрения бережливых производственных систем на предприятии может быть следующая последовательность.

1. Исследование текущего состояния производственных процессов, эффективности использования ресурсов, качества продукции, затрат. Это может быть карта потока создания ценности, позволяющая в формате блок-схемы выстроить всю цепочку создания продукта – от закупки сырья до поставки конечному потребителю [4]. Также можно использовать диаграмму Макигами, которая считается структурированной картой потока создания ценности.

2. Идентификация потерь и определение того, какого рода потери были выявлены. Для выявления, видовой и количественной идентификации потерь производственных процессов разрабатывается и заполняется карта потерь [5].

3. Определение конкретных целей исходя из текущего состояния и выявленных потерь, а также определение ожидаемых результатов. Для постановки и согласования целей может быть использована методика SMART, критерии которой должны быть определенными, измеримыми, достижимыми, реалистичными и ограниченными во времени [6, 7].

4. Обучение персонала основам бережливого производства и формирование команды по вне-

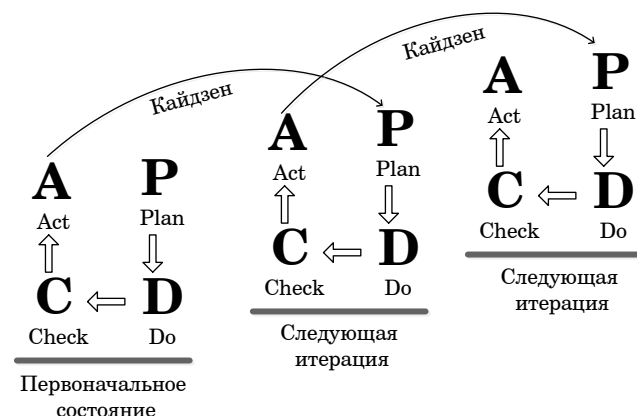
дрению и поддержанию бережливых практик. Важно отметить, что необходимо донести до персонала, что бережливое производство – это не набор инструментов и методов, а философия и образ жизни организации.

5. Применение инструментов бережливого производства. Постепенно внедрять инструменты бережливого производства, в зависимости от целей организации и ее специфики [8, 9].

6. Необходимо регулярно измерять и оценивать результаты внедрения бережливых практик, сравнивая с начальными данными и целями, и при необходимости вносить коррективы. Создать систему контроля и поддержания бережливых практик, включая обновление и адаптацию процессов, обучение сотрудников и поощрение их участия в улучшении производства (рис. 2) [10, 11].

Самым важным этапом будет формирование культуры непрерывного улучшения, где каждый сотрудник активно участвует в поиске и внедрении новых идей и лучших практик для повышения эффективности и бережливости производства (рис. 2).

Совместное применение цикла Шухарта – Деминга с практикой Кайдзен даст наиболее по-



• *Рис. 2. Взаимосвязь цикла PDCA и Кайдзен*
 • *Fig. 2. The relationship between the PDCA cycle and Kaizen*

ложительный эффект за счет детализации этапов Plan-Do-Check-Act, совмещенных с непрерывным совершенствованием процессов производства, разработки вспомогательных бизнес-процессов и управлением маленькими шагами.

Результаты исследования

Непрерывное совершенствование, являющееся ключевым принципом проектирования бережливого производства, гарантирует регулярную оценку процессов, внедрение постепенных изменений и укрепление культуры непрерывного обучения и адаптации и позволит повысить гибкость и адаптивность бережливых производственных систем.

Адаптация философии бережливого производства и Кайдзен на отечественных предприятиях может привести к значительным улучшениям в эффективности производства и управлении бизнесом. Результаты могут помочь оптимизиро-

вать процессы производства, уменьшить потери времени и ресурсов, что приведет к увеличению производительности, сокращению издержек на производство.

Заключение

Разработка бережливых производственных систем необходима организациям, стремящимся достичь наибольшей эффективности и гибкости. Внедряя элементы и перенимая философию бережливого производства, отечественные организации могут оптимизировать производственные процессы, снизить затраты и повысить ценность для потребителей. Переход на корпоративную культуру, ориентированную на непрерывное совершенствование, поможет сформировать систему бережливого производства, таким образом, переходя от традиционных производственных систем к бережливым производственным системам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Развитие бережливых производственных систем в России: от истории к современности: коллективная монография / под ред. Ю. П. Адлера, Э. В. Кондратьева. М.: Академ. проект, 2018. 226 с.
2. *Лайкер Дж. К.* Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира. М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. 402 с.
3. *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. Doi: 10.31799/2077-5687-2021-4-49-56. EDN: FMXNEH.
4. ГОСТ Р 57524-2017 Бережливое производство. Поток создания ценности. М.: Стандартинформ, 2021. 18 с.
5. *Мизиковский И. Е.* Методика управленческого учета производственных потерь предприятий обрабатывающих отраслей // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. Сер.: Соц. науки. 2017. № 2 (46). С. 24–30.
6. *Луценко С. И.* Принцип SMART: как ставить цели сотрудникам, КППЭ и программы стимулирования // Лин-технологии: Бережливое производство. 2023. № 2. С. 45–56.
7. ГОСТ Р ИСО 10019–2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент организации. Руководство по выбору консультантов по системам менеджмента качества и использованию их услуг. М.: Стандартинформ, 2007. 19 с.
8. *Винниченко А. В.* Комбинаторика цифровых решений для задач бережливого производства // Системный анализ и логистика. 2023. № 1 (35). С. 59–66. Doi: 10.31799/2077-5687-2023-1-59-66. EDN: VFSGGC.
9. Адаптация элементов бережливого производства под внутреннюю среду предприятий / М. Ю. Рудюк, С. В. Чекайкин, Э. Р. Дасаева, С. Э. Сенина // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 4 (118). С. 18–26.
10. ГОСТ Р 56020. Бережливое производство. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2021. 20 с.
11. ГОСТ Р 56404–2021. Бережливое производство. Требования к системам менеджмента. М.: Стандартинформ, 2021. 20 с.

REFERENCES

1. Development of lean production systems in Russia: from history to the present: a collective monograph; eds by Yu. P. Adler, E. V. Kondratiev. Moscow: Academic project; 2018. 226 p. (In Russ.).
2. Liker J. K. Toyota Dao: 14 principles of management of the world's leading company. Moscow: Alpina Business Books; 2005. 402 p. (In Russ.).

3. 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.). Doi: 10.31799/2077-5687-2021-4-49-56. EDN: FMXNEH.
4. GOST R 57524-2017. Lean manufacturing. Value creation stream. Moscow: Standartinform; 2021. 18 p. (In Russ.).
5. Mizikovskiy I. E. Methodology of management accounting of production losses of enterprises of manufacturing industries. Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. Series: Social sciences. 2017;(2(46)):24–30 (In Russ.).
6. Lutsenko S. I. The SMART principle: how to set goals for employees, KPIs and incentive programs. Lean technologies: Lean manufacturing. 2023;(2):45–56.
7. GOST R ISO 10019-2007. The national standard of the Russian Federation. Management of the organization. Guidelines for the selection of consultants on quality management systems and the use of their services. Moscow: Standartinform; 2007. 19 p. (In Russ.).
8. Vinnichenko A. V. Combinatorics of digital solutions for lean production tasks. System analysis and logistics. 2023;(1(35)):59–66. (In Russ.). Doi: 10.31799/2077-5687-2023-1-59-66. EDN: VFSGGC.
9. Rudyuk M. Yu., Chekaykin S. V., Dasaeva Z. R., Senina S. E. Adaptation of lean production elements to the internal environment of enterprises, Science and business: ways of development. 2021;(4(118)):18–26. (In Russ.).
10. GOST R 56020. Lean manufacturing. Basic provisions and dictionary. Moscow: Standartinform; 2021. 20 p. (In Russ.).
11. GOST R 56404-2021. Lean manufacturing. Requirements for management systems. Moscow: Standartinform; 2021. 20 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Винниченко Александра Валерьевна, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование и проектирование бережливых производственных систем, автоматизированные системы управления.

Поступила в редакцию 24.03.2024

Поступила после рецензирования 29.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Vinnichenko Alexandra V., Senior Lecturer at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling and design of lean production systems, automated control systems.

Received 24.03.2024

Revised 29.03.2024

Accepted 04.04.2024

Организационный дизайн эвристическими моделями

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 условиях постоянно изменяющейся деловой среды современные организации сталкиваются с необходимостью адаптации своих структур для обеспечения устойчивости и конкурентоспособности. Эвристические модели организационного дизайна предлагают альтернативный подход к традиционному структурированию предприятий, акцентируя внимание на гибкости, модульности и итеративности. В данном исследовании рассматриваются теоретические и практические аспекты применения эвристических моделей в организационном дизайне, анализируется их влияние на оперативную эффективность и инновационную активность предприятий.

Ключевые слова: эвристические модели, организационный дизайн, инновационная активность, организационная система

Для цитирования: Пашина Е. А., Назаревич С. А. Организационный дизайн эвристическими моделями // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 22–25. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-22-25.

Original article

Organizational design by heuristic models

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 an ever-changing business environment, modern organizations are faced with the need to adapt their structures to ensure sustainability and competitiveness. Heuristic models of organizational design offer an alternative approach to traditional enterprise structuring, emphasizing flexibility, modularity, and iterativity. This article examines theoretical and practical aspects of applying heuristic models in organizational design, analyzing their impact on operational efficiency and innovation activity of enterprises.

Keywords: heuristic models, organizational design, innovation activity, organizational system

For citation: Pashina E. A., Nazarevich S. A. Organizational design by heuristic models. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):22–25. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-22-25.

Современный бизнес-ландшафт характеризуется быстрыми изменениями технологий, маркетинговых стратегий и потребительских предпочтений. В динамичной среде традиционные иерархические структуры организаций часто оказываются неэффективными, поскольку не способны быстро адаптироваться к новым изменениям. Эвристические модели предлагают подход, основанный на принципах гибкости, адаптации и непрерывного обучения [1, 2].

Эвристический подход к организационному дизайну основывается на использовании простых, но эффективных правил и методов для решения сложных проблем в условиях неопределенности. Эти методы помогают организациям

быстро адаптироваться к изменениям, минимизируя затраты на анализ и планирование.

В современной экономике требования к организационной структуре компаний становятся все более строгими. Глобализация, технологические инновации и ускоряющийся темп изменений во внешней среде заставляют организации искать новые подходы к организационному дизайну. Эвристические модели позволяют компаниям быть адаптивными, гибкими и открытыми к инновациям, основываясь на принципах модульности, адаптивности, сетевой интеграции, гибкости и децентрализации, предлагают возможности для развития и внедрения инновационных процессов [3, 4]. Исследование и анализ различных

эвристических моделей организационного дизайна, основные характеристики, проблемы и функциональный потенциал позволяют определить наиболее эффективные пути для повышения инновационной активности и адаптивности компаний (табл. 1).

Анализ эвристических моделей организационного дизайна демонстрирует, что современным компаниям для успешной адаптации к быстро меняющимся рыночным условиям и повышения своей инновационной активности необходимо принимать во внимание гибкость, модульность, адаптивность, сетевую интеграцию и децентрализацию в управлении. Внедрение эвристических моделей требует не только структурных изменений в организации, но и изменений в кор-

поративной культуре, подходах к управлению и внешней коммуникации [5].

Рассматривая различные эвристические модели организационного дизайна и их вклад в инновационный процесс, необходимо учесть, как эти теоретические подходы воплощаются в конкретных организационных системах. Каждая модель представляет собой комплекс, который может быть адаптирован или трансформирован в рамках различных типов организационных структур [6, 7]. Детальное изучение различных видов организационных систем, особенностей их структуры и функционирования, анализ проблем, с которыми эти системы сталкиваются при реализации инновационных проектов, обеспечат представление о том, как эвристические принци-

- Таблица 1. Эвристические модели
- Table 1. Heuristic models

Номер	Эвристические модели	Описание	Проблема	Функциональный потенциал
1	Модульный дизайн	Модель, основанная на разделении организации на автономные, но взаимосвязанные модули, каждый из которых отвечает за определенную функцию или процесс	Трудности в координации между модулями могут привести к увеличению времени реализации проектов и ухудшению общей эффективности	Повышение гибкости и адаптивности к изменениям внешней среды, ускорение процесса внедрения инноваций за счет упрощения взаимодействия между различными подразделениями
2	Адаптивное управление	Подход, подразумевающий постоянную готовность организации к изменениям и способность быстро адаптироваться к новым условиям рынка	Риск потери централизованного контроля над процессами, что может привести к снижению эффективности выполнения задач	Реализация инновационных проектов в условиях неопределенности и быстрого изменения рыночных трендов благодаря гибкому перераспределению ресурсов и корректировке стратегических целей
3	Сетевая структура	Организационная модель, представляющая собой сеть взаимосвязанных подразделений и внешних партнеров, сотрудничающих для достижения общих целей	Высокие требования к управлению коммуникациями и потенциальное увеличение риска утечки конфиденциальной информации	Ускорение инновационного процесса и расширение возможностей для взаимодействия за счет эффективного взаимодействия с партнерами и интеграции внешних инноваций
4	Гибкие методологии	Методы управления проектами, акцентирующие внимание на гибкости процессов, вовлеченности команды и быстрой адаптации к изменяющимся условиям	Сложности в масштабировании для крупных организаций и проектов, потенциальная неструктурированность процессов	Повышение эффективности разработки и внедрения инноваций через максимальную адаптацию к текущим потребностям проекта и участие всех членов команды в процессе управления
5	Децентрализация	Распределение полномочий и ответственности по принятию решений от центрального управленческого аппарата к отдельным подразделениям или работникам	Возможность снижения единообразия в принятии решений, что может привести к несогласованности действий и целей внутри организации	Ускорение процесса принятия решений и повышение уровня ответственности сотрудников за результат, что способствует инновационной активности на всех уровнях управления

- Таблица 2. Виды организационных систем
- Table 2. Types of organizational systems

Номер	Организационная система	Проблемы при реализации инноваций
1	Иерархическая система	Жесткая структура, низкая адаптивность к изменениям, длительное принятие решений, сопротивление изменениям со стороны сотрудников
2	Матричная система	Конфликты из-за пересечения полномочий, сложности с координацией между подразделениями, проблемы с эффективностью коммуникации
3	Сетевая система	Управление внешними партнерствами, риск потери контроля над ключевыми процессами, сложность с обеспечением конфиденциальности и защитой интеллектуальной собственности
4	Проектно-ориентированная система	Сложности с ресурсным обеспечением проектов, риск истощения внимания управленческой команды, вызовы в поддержании долгосрочного фокуса во время краткосрочных проектных инициатив
5	Гибкая система	Сложности масштабирования для крупных организаций, зависимость от высокой квалификации и мотивации команд, потенциальная неструктурированность и неформализованность процессов

пы реализуются для повышения инновационного потенциала организаций (табл. 2).

Организационная система компании оказывает существенное влияние на эффективность и скорость внедрения инноваций. Каждая система обладает преимуществами и недостатками, которые могут либо способствовать, либо препятствовать инновационной активности. Понимание и управление проблемами через разработку соответствующих стратегий и принятие адаптивных управленческих подходов повышают способность

организации к инновациям и обеспечивают ее устойчивое развитие в будущем [8, 9].

Эвристические модели организационного дизайна представляют собой мощный инструмент для современных предприятий, стремящихся к повышению своей гибкости и способности адаптироваться к быстро меняющимся условиям рынка. Ключевыми факторами успеха являются готовность к изменениям, культура непрерывного обучения и интеграция обратной связи в процесс организационного развития.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чесбро Г. Открытые инновации. М.: Поколение, 2007. 336 с.
2. Харгадон Э. Управление инновациями: опыт ведущих компаний. М.: Вильямс, 2007. 290 с.
3. Туккель И. Л., Сурина А. В., Культин Н. Б. Управление инновационными проектами. СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 416 с.
4. Туккель И. Л. Методы и инструменты управления инновационным развитием промышленных предприятий. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 209 с.
5. Зарецкий А. Д., Иванова Т. Е. Промышленные технологии и инновации. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
6. Меняев М. Ф. Цифровое управление инновационными проектами: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2020. 304 с.
7. Фасхиев Х. А. Модель управления инновационной деятельностью предприятия // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 4. С. 11–28.
8. Андрейчиков А. В. Стратегический менеджмент в инновационных организациях: системный анализ и принятие решений. М.: Вуз. учебник: ИНФРА-М, 2013. 394 с.
9. Назаревич С. А., Пашина Е. А. Визионерская инноватика как инструмент цифровой трансформации // Инновационное приборостроение. 2023. № 5. С. 43–48. Doi: 10.31799/2949-0693-2023-5-43-48.

REFERENCES

1. Chesbro G. Open Innovations. Moscow: Pokolenie; 2007. 336 p. (In Russ.).
2. Hargadon A. Management of Innovations: experience of leading companies. Moscow: Williams; 2007. 290 p. (In Russ.).
3. Tukkel I. L., Surina A. V., Kultin N. B. Management of innovative projects. SPb.: BHV-Peterburg; 2017. 416 p. (In Russ.).

4. Tukkel I. L. Methods and tools of management of innovative development of industrial enterprises. SPb.: BHV-Peterburg; 2013. 209 p. (In Russ.).
5. Zaretsky A. D., Ivanova T. E. Industrial technologies and innovations. SPb.: Piter; 2018. 480 p. (In Russ.).
6. Menyayev M. F. Digital management of innovation projects: study guide for universities. SPb.: Piter; 2020. 304 p. (In Russ.).
7. Faskhiev H. A. Model of management of innovative activity of the enterprise. Management in Russia and abroad. 2013;(4):11–28. (In Russ.).
8. Andreychikov A. V. Strategic management in innovative organizations: system analysis and decision-making. Moscow: Vuz. textbook: INFRA-M; 2013. 394 p. (In Russ.).
9. Nazarevich S. A., Pashina E. A. Visionary innovation as a tool for digital transformation. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(5):43–48. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2023-5-43-48.

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 25.03.2024

Поступила после рецензирования 29.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Pashina Elena A., Student of 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 – assessment of the degree of novelty of innovative products, qualimetric assessment, process management.

Received 25.03.2024

Revised 29.03.2024

Accepted 04.04.2024

Научная статья
УДК 65.011.46

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-26-31

Модели обеспечения качества прогнозирования несоответствий в производственной системе

Александра Иосифовна Верховская¹

✉ verkhovsky2901@gmail.com, orcid.org/0009-0007-0844-8482, SPIN-код: 4801-3022

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. Каждая система нуждается в управлении несоответствиями, которые могут быть нормативными, техническими или организационными. Несоответствия могут вызвать дорогостоящие инциденты или аварии в компании, нанести ущерб как качеству продукции, так и здоровью и безопасности сотрудников. Поэтому необходимо уметь выявлять, управлять и прогнозировать несоответствия, а также вероятность их возникновения. Обеспечение качества требует стратегий и процессов по устранению дефектов, но на практике полностью бездефектный процесс трудно представить из-за различных причин, таких как дефектные компоненты, случайные сбои в процессе, отказы оборудования, разработка новой продукции и внедрение новых технологий. Поэтому необходимо предусмотреть возможное наличие несоответствий. Для прогнозирования несоответствий необходимо выбирать эффективные модели, чтобы минимизировать потери производственной системы. Инструменты прогнозирования несоответствий должны быть выбраны в соответствии с потребностями и характеристиками компании и производственной системы.

Ключевые слова: технологический риск, несоответствие, дефект, корректирующие действия

Для цитирования: Верховская А. И., Назаревич С. А. Модели обеспечения качества прогнозирования несоответствий в производственной системе // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 26–31. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-26-31.

Original article

Quality assurance models for forecasting nonconformities in the production system

Alexandra I. Verkhovskaya¹

✉ verkhovsky2901@gmail.com, orcid.org/0009-0007-0844-8482, SPIN-code: 4801-3022

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. Every system needs to manage non-conformities, which can be regulatory, technical or organizational. Non-conformances can cause costly incidents or accidents in a company, and can damage both product quality and the health and safety of employees. Therefore, it is necessary to be able to identify, manage and predict non-conformances and their likelihood of occurrence. Quality assurance requires strategies and processes to eliminate defects, but in reality a completely defect-free process is hard to imagine due to various causes such as defective components, random process failures, equipment failures, new product development and the introduction of new technologies. Therefore, it is necessary to anticipate the possible existence of nonconformities. For predicting non-conformities, efficient models should be selected to minimize the losses of the production system. Nonconformance prediction tools should be selected according to the needs and characteristics of the company and the production system.

Keywords: technological risk, nonconformity, defect, corrective actions

For citation: Verkhovskaya A. I., Nazarevich S. A. Quality assurance models for forecasting nonconformities in the production system. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):26–31. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-26-31.

Введение

Любая система требует внедрения подхода к управлению несоответствиями. Эти несоответствия, будь они нормативного, технического или организационного происхождения, могут стать источниками инцидентов или аварий, которые

дорого обходятся предприятию. Может пострадать не только качество продукции, но и здоровье и безопасность сотрудников организации. Поэтому необходимо знать, как выявлять несоответствия, управлять, а также прогнозировать не только последствия несоответствий, но и перспективу их появления.

Обеспечение качества означает выстраивание стратегии и реализацию процессов с постоянной необходимостью исключения дефектов.

Однако трудно представить себе процесс, полностью свободный от дефектов на протяжении всего его жизненного цикла, по разным причинам: дефектные компоненты, случайное смещение процесса, поломки оборудования, запуск и разработка новых продуктов, внедрение технологий и т. д.

Поэтому необходимо предвидеть потенциальное наличие несоответствий, помня о том, что модели их прогнозирования должны быть эффективными настолько, чтобы при всей неизбежности появления несоответствий производственная система функционировала с минимальными потерями. Следовательно, необходимо выбирать инструменты прогнозирования возникающих несоответствий, опираясь на индивидуальные запросы предприятия и особенности как производственной системы в целом, так и жизненного цикла конкретной продукции в частности [3].

Материал и методы исследования

Система менеджмента качества, несомненно, является основой управления технологическими процессами, так как теоретически учитывает производственные риски и возможные несоответствия. Следовательно, необходимо, в первую очередь, определить, какие именно несоответствия могут выявиться в рамках производственного процесса, и проанализировать модели прогнозирования, опираясь на типологию несоответствий.

Несоответствие возникает, когда в ходе деятельности или процесса происходит сбой или отклонение. Оно может быть вызвано аномалией во время выполнения деятельности (человеческий фактор, техническая проблема и т. д.), появлением внешнего элемента, который ухудшает качество услуги (климатические условия, инородное тело, загрязнение и т. д.), или непригодностью операционной процедуры для получения ожидаемых результатов. Дефект систематически требует корректирующих действий, поскольку представляет опасность для здоровья, безопасности людей или качества выпускаемой продукции.

Раннее обнаружение несоответствий (табл. 1) следует рассматривать как возможность улучшения ситуации. При наличии эффективного алгоритма действий в таких ситуациях, зафиксированного в нормативной и технической документации, предприятие даже может воспользоваться несоответствиями и использовать их в своих интересах [1].

Анализ эффективности существующих инструментов прогнозирования возникающих несоответствий

Методика работы с несоответствиями должна отвечать требованиям к продукции, предъявляемым государственными стандартами, а также стандартам качества и требованиям заказчика. Таким образом, инструментарий прогнозирования должен быть в достаточной мере гибок и адаптируем на случай появления различных типов несоответствий.

Для начала рассмотрим усредненный алгоритм действий при обнаружении несоответствия.

Исходя из последовательности действий, описанной в табл. 2, следует заметить, что подобный алгоритм является достаточно эффективным, так как корректирующие меры разрабатываются и документируются с опорой на реальные ситуации на производстве. Однако разработка такого количества корректирующих действий чревата тем, что предприятие уходит от стратегии прогнозирования, по сути, разрабатывая документацию под уже пройденные ситуации. Таким образом, можно предотвратить исключительно известные несоответствия. Тем не менее совершенно очевидно, что многие несоответствия являются достаточно непредсказуемыми для руководителя, поэтому могут нанести большой урон производственному циклу. Следовательно, важным является вопрос прогнозирования несоответствий, с которыми предприятие до этого не сталкивалось, но может столкнуться.

Выявление несоответствий, несомненно, является основой любого подхода к управлению рисками и способствует постоянному совершенствованию системы менеджмента качества. Выявление должно проводиться как можно раньше, до того, как инцидент окажет влияние на бизнес.

Предотвращение несоответствий – ключевой элемент хорошего контроля качества. В идеале цель должна заключаться в том, чтобы свести к минимуму количество несоответствий или даже гарантировать, что их не будет. Однако для достижения этой цели необходимо сначала внедрить передовые методы, чтобы предотвратить или хотя бы снизить частоту возникновения несоответствий:

- 1) установление четко определенных процессов, охватывающих все элементы, которые могут оказать влияние на запрашиваемые требования;
- 2) надлежащее обучение и информирование сотрудников о существующих процессах;
- 3) мотивация сотрудников посредством установки понимания, что их работа признана и важна (например, путем посещения объектов);

- Таблица 1. Документальное сопровождение несоответствий на предприятии
- Table 1. Documentary support of nonconformities at the enterprise

Тип	Несоответствие	Документация, устанавливающая требования к процедуре	Порядок действия
1	Несоответствие, устранение которого требует переделки/ремонта/дополнительного испытания/инспекции	Технические спецификации; техническое задание, рабочая документация, технологическая документация, нормативные документы, требования договора на изготовление и (или) поставку	Регистрация несоответствия, анализ причин, корректирующие действия в соответствии с существующей документацией, возобновление производственного цикла
2	Несоответствие, устранение которого требует переделки/ремонта/дополнительного испытания/инспекции, но при этом требуется разработка дополнительных процедур для устранения несоответствия	Технические спецификации; техническое задание, рабочая документация, технологическая документация, нормативные документы, требования договора на изготовление и (или) поставку	Регистрация несоответствия, анализ причин, разработка дополнительных процедур и их фиксация, корректирующие действия в соответствии с существующей документацией и разработанными документами, возобновление производственного цикла
3	Несоответствие, при котором продукция с таким несоответствием может использоваться без дополнительного ремонта/переделки, дополнительного испытания/инспекции	Обоснование в нормативной документации, содержащее решения по несоответствиям со ссылкой на действующие документы, технологическую документацию, а также оформляемые отдельные документы, прилагаемые к ведомости	Регистрация несоответствия, анализ причин, возобновление производственного цикла
4	Несоответствие, при котором требования не могут быть достигнуты, а продукция подлежит замене	–	Регистрация несоответствия, анализ причин

- Таблица 2. Механизм работы предприятия с несоответствиями
- Table 2. Mechanism of work of the enterprise with nonconformities

Номер	Этап	Действия сотрудников
1	Обнаружение несоответствия	Необходимо четко описать несоответствие и предоставить такую информацию, как доказательства, подтверждающие несоответствие; документ, указывающий на то, что должно было быть сделано, но не было сделано; дата и лицо, обнаружившее несоответствие, и т. д.
2	Немедленное исправление несоответствия (в случае, если относится к типам 1–2 (табл. 1))	После того, как несоответствие было обнаружено и должным образом задокументировано, его необходимо исправить, чтобы устранить основное несоответствие в краткосрочной перспективе. Но на этом работа не заканчивается: поскольку речь идет не о разовой проблеме, а о проблеме, которая, скорее всего, будет повторяться неоднократно, необходимо также устранить ее первопричину
3	Выявление и анализ первопричины несоответствия	Использование различных аналитических инструментов с целью выявления конкретной первопричины возникшего несоответствия
4	Планирование и реализация корректирующих действий для устранения первопричины	Как только становится известна основная причина несоответствия, необходимо определить одно или несколько корректирующих действий, ответственных за их выполнение и график их реализации
5	Проверка эффективности корректирующих мер	Эффективность мер в данном случае проверяется при повторении ситуации, в рамках которой могло возникнуть упомянутое несоответствие, но не возникло, так как корректирующие действия повлияли на производственный процесс

4) использование соответствующих инструментов, включая калиброванное программное обеспечение;

5) быстрое выполнение корректирующих действий для устранения несоответствий в прошлом и предотвращения их повторения в будущем;

6) выявление и контроль известных рисков, связанных с несоответствиями.

Учитывая, что при разработке продукции принято принимать во внимание необходимость решения ситуационных задач, обратимся к инструментам, относящимся к ситуационному управлению, ситуативному реагированию, а также прогнозированию различных моделей работы в случае появления дефектной продукции или оборудования [2].

Одним из подходов системного моделирования продукции, отражающим необходимость учитывать возможное появление несоответствий, является научная концепция проектирования и прогнозирования показателей качества.

В данном конкретном случае необходимо говорить о включении моделирования качества материалов, показателей качества продукции и технологических процессов. В вопросах, связанных с продукцией и прогнозированием ее качества с учетом возможных несоответствий, не имевших до этого прецедентов, остается актуальным метод Тагучи.

Дизайн экспериментов используется в промышленных исследованиях и разработках для следующих целей:

– моделирование для прогнозирования поведения процесса;

– определение ключевых факторов при разработке нового продукта или процесса;

– оптимизация настроек производственного процесса или измерительного устройства.

Метод Тагучи направлен на упрощение экспериментального протокола (испытаний или моделирования) с целью выявления влияния факторов на отклик. Его преимущество заключается в том, что он значительно сокращает количество испытаний, сохраняя при этом высокую точность.

Модель является ключевым элементом стратегии разработки эксперимента. Экспериментатор может свободно выбирать факторы и взаимодействия, которые будут изучаться в соответствии с предложенной им моделью, в тесном соответствии со своими целями.

Однако несоответствия, выявленные таким образом, будут опять же базироваться на ситуациях, смоделированных исследователем самостоятельно, а следовательно, вполне вероятно, далеких от тех реальных дефектов, с которыми может столкнуться производство.

Безусловно, наиболее подходящий контекст несоответствия – это риск, так как сама формулировка свидетельствует о том, что это влияние на процесс какой-либо неопределенности. Интегрирование методологии квалиметрии технологических рисков в концепцию прогнозирования показателей качества продукции может существенно повлиять на прогнозирование уровня качества на предприятии в целом.

Алгоритм действий должен быть следующим:

1) подробно описать технологические процессы на предприятии, а также составить максимально полную модель производственного цикла;

2) идентифицировать основные риски возникновения несоответствий (с какими показателями работа должна быть особенно внимательной, на что необходимо обратить максимальное внимание);

3) собрать и проанализировать данные об имевшихся несоответствиях и предпринятых корректирующих действиях;

4) идентифицировать факторы, оказавшие наибольшее влияние на появление несоответствий, и ранжировать их;

5) изучить взаимосвязи между факторами и рисками (определение коэффициентов управляемости рисками, выявление наиболее чувствительных и важных рисков, выявление механизмов (факторов) управления ими и их ранжирование);

6) поиск универсальных решений прогнозирования и устранения несоответствий;

7) разработка продукции [2].

В данном случае необходимо говорить о предъявлении требований к уровню качества технологических процессов и производимой продукции.

«Технологический риск» – это понятие, состоящее из множества различных компонентов. Он возникает в результате присутствия на территории объекта, который работает с веществами или применяет методы или процессы, способные вызвать опасные явления, в условиях социально-экономических и экологических проблем. Управление технологическими рисками в принципе не должно снижать темпов развития не только в связи с обнаруживающимися несоответствиями, но и в связи с динамически меняющимся миром, предлагающим обновленные технологические модели развития предприятий [3]. В перспективе необходимо работать над тем, чтобы понятие риска, а также непосредственно конкретные риски, возникающие в рамках производственного процесса, стали тем самым динамичным показателем, способным оказывать положительное влияние на экономическое состояние предприятия и качество технологических процессов [4].

Заключение

Выявление несоответствий является основой управления рисками и улучшения системы менеджмента качества. Чтобы достичь минимального количества несоответствий, нужно внедрить лучшие практики: установление процессов, обучение и информирование сотрудников, мотивация, использование инструментов и оперативное выполнение корректирующих действий. Также необходимо выявлять и контролировать известные риски, связанные с несоответствиями. При разработке продукции также важно учитывать ситуационное управление, реагирование и прогнозирование различных моделей работы.

Управление несоответствиями – серьезная задача для компаний, применяющих подход к ка-

честву, независимо от сферы их деятельности. Начиная с начальных этапов обнаружения и заканчивая внедрением корректирующих мер и цифровых решений, необходимо понимать, как важно минимизировать негативные последствия, улучшить подход к качеству и гарантировать удовлетворенность клиентов.

Предотвращение несоответствий – ключевой элемент хорошего контроля качества. В идеале цель должна заключаться в том, чтобы свести к минимуму количество несоответствий или даже гарантировать, что их не будет. Однако для достижения этой цели необходимо сначала внедрить передовые методы, чтобы предотвратить или хотя бы снизить частоту возникновения несоответствий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 6 50.02.02-2017. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия продукции. Классификация несоответствий. М.: Стандартинформ, 2018. 14 с.
2. Янковская В. С., Дунченко Н. И., Михайлова К. В. Разработка структурированных молочных продуктов с учетом данных о рекламациях и методологии квалиметрии рисков // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52, № 1. С. 1–12.
3. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. М.: Стандартинформ, 2020. 90 с.
4. 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. GOST 6 50.02.02-2017. System of conformity assessment in the field of atomic energy use. Conformity assessment of products. Classification of nonconformities. Moscow: Standardinform; 2018. 14 p. (In Russ.).
2. Yankovskaya V. S., Dunchenko N. I., Mikhailova K. V. Development of structured dairy products taking into account the claims data and risk qualification methodology. Technics and technology of food production. 2022;52(1):1–12. (In Russ.).
3. GOST P 58771-2019. Risk management. Technologies of risk assessment. Moscow: Standardinform; 2020. 90 p. (In Russ.).
4. Nazarevich S. A. Indicators of innovative behavior for monitoring the state of readiness of the organizational system to make changes. Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov. 2023;21(1):126–133. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Верховская Александра Иосифовна, аспирант, ассистент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – научные основы и совершенствование методов стандартизации и менеджмента качества (контроль, управление, обеспечение,

Verkhovskaya Alexandra I., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – scientific bases and improvement of methods of standardisation and quality management (control, management, assurance, improvement, quality planning) of objects and services at different stages of

повышение, планирование качества) объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции, научно-практическое развитие инженерных инструментов управления, организации производственных систем, а также баз знаний.

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 25.03.2024

Поступила после рецензирования 29.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

product life cycle, as well as scientific and practical development of engineering management tools, organisation of production systems and knowledge bases.

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 – assessment of the degree of novelty of innovative products, qualimetric assessment, process management.

Received 25.03.2024

Revised 29.03.2024

Accepted 04.04.2024

Анализ сложных композитных материалов с содержанием метакриловых мономеров спектрофотометром, работающим в диапазоне длин волн 200–1100 нм

Евгений Евгеньевич Майоров¹

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

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

Аннотация. Настоящая статья посвящена изучению оптических параметров композитов, фотополимеризованных при $t = 10$ с в различных температурных условиях автоматизированным спектрофотометром. Перспективно использовать спектрофотометры для изучения оптических свойств композиционных материалов, так как эти приборы предоставляют достоверную, надежную и высокоточную информацию об исследуемом объекте. Изучение оптических параметров образцов композита разных лет изготовления, отвержденных в течение стандартного рекомендованного времени при различных температурах, автоматизированным спектрофотометром и явилось целью настоящей работы. Получены спектральные зависимости коэффициента поглощения от длины световой волны $K(\lambda)$ образцов Estelite Asteria оттенков А3.5В, А4В, В3В при времени фотополимеризации $t = 10$ с и температурах $T = 20$ и 47 °С. Выявлено, что при нагревании композитов оптическое качество реставраций не снижалось.

Ключевые слова: время фотополимеризации, спектрофотометр, светофильтр, температура, композит, двухлучевая схема, коэффициент поглощения

Для цитирования: Майоров Е. Е. Анализ сложных композитных материалов с содержанием метакриловых мономеров спектрофотометром, работающим в диапазоне длин волн 200–1100 нм // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 32–37. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-32-37.

Original article

Analysis of complex composite materials containing methacrylic monomers with a spectrophotometer operating in the wavelength range of 200–1100 nm

Evgeny E. Maiorov¹

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

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

Abstract. This article is devoted to the study of the optical parameters of composites photopolymerized at $t = 10$ s under various temperature conditions by an automated spectrophotometer. It is promising to use spectrophotometers to study the optical properties of composite materials, since these devices provide reliable, reliable and highly accurate information about the object under study. The study of the optical parameters of composite samples of different years of manufacture, cured during the standard recommended time at various temperatures, by an automated spectrophotometer was the purpose of this work. Spectral dependences of the absorption coefficient $K(\lambda)$ of Estelite Asteria samples of shades А3.5В, А4В, В3В were obtained at photopolymerization time $t = 10$ s and temperatures $T = 20$ and 47 °C. It was revealed that the optical quality of the restorations did not decrease when the composites were heated.

Keywords: photopolymerization time, spectrophotometer, light filter, temperature, composite, two-beam circuit, absorption coefficient

For citation: Maiorov E. E. Analysis of complex composite materials containing methacrylic monomers with a spectrophotometer operating in the wavelength range of 200–1100 nm. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):32–37. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-32-37.

Введение

Оптико-механические, оптико-электронные и технологии компьютерной оптики занимают одно из ведущих мест в отечественной науке и технике, а также приборостроительной промыш-

ленности [1]. Оптические приборы и комплексы находят широкое применение в различных направлениях деятельности человека – в научных исследованиях, на современных производствах, при создании различных конструкций, в искусстве, биологии, медицине и т. д. [2]. В зависимо-

сти от реализации этих приборов и комплексов определяется место человека при эксплуатации. Если экспериментатор использует свое зрение, то приборы содержат в основном оптические и механические узлы [3]. При работе прибора без участия экспериментатора световая энергия преобразуется в электрическую посредством различных фотоприемных устройств [4]. В процессе сбора и обработки светового излучения устройство формирует сигнал, который используется для выполнения функциональной задачи прибора или комплекса. Как правило, такие приборы и комплексы имеют сложные оптико-электронные и цифровые системы и элементы автоматического управления [5].

Совершенствование микроэлектроники и компьютерной техники явилось новой ступенью развития современных оптических приборов и комплексов. Среди многообразия оптических приборов и комплексов особое внимание заслуживают спектральные приборы. Спектральные приборы имеют большую востребованность в машиностроении, химии, биологии, медицине и многих других областях науки и техники для анализа состава исследуемого вещества регистрацией спектра излучения, испускаемого или поглощаемого веществом [6]. В последние годы наблюдается тенденция использования дифракционных решеток совместно с интерферометром Майкельсона в современных спектральных приборах [7].

Разработчики спектральных приборов и комплексов стараются максимально разгрузить оптические системы приборов, устанавливая диспергирующий элемент не в параллельных, а в расходящихся или в сходящихся световых пучках. Именно вогнутая дифракционная решетка исключила коллиматорный и фокусирующий объективы, взяв их функции на себя. Изменения коснулись и осветительной системы спектральных приборов: переход от линзовых конденсоров к зеркальным позволил уменьшить погрешность измерений, повысить чувствительность измерений в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра [8].

При разработке спектрофотометров огромные успехи достигнуты в фотоэлектрической части этих приборов. Создаются спектрофотометры с автоматической перестройкой одного фотоприемника на другой в зависимости от исследуемой области спектра. Как правило, эти приборы построены по двухлучевой схеме. Они сравнивают две монохроматические волны, одна из которых проходит через контролируемый объект, а другая – через эталон [9].

Современные спектрофотометры зарекомендовали себя в исследовании новейших стоматоло-

гических композитных материалов. Их технические характеристики удовлетворяют требованиям анализа для твердофазных, жидкофазных и газообразных сред [10]. Анализ научно-технических источников показал, что спектрофотометры разных производителей активно используются для выявления оптических свойств новых композиционных материалов. Измеряются спектры отражения стоматологических материалов на основе метилметакрилатных смол Omnichroma, Estelite Asteria NE, Filtek Ultimate flowable A2, Harmonize A2 enamel, Filtek Z550 A2, Omnichroma Blocker, Estelite Asteria A2B, Filtek Ultimate flowable OA2, Harmonize A2 dentin, Filtek Z550 OA2 и твердых тканей зуба *in vitro*, изучаются оптические свойства интерфейса и пограничной области соединения стоматологических адгезивов и композитных цемента с твердыми тканями зуба. Современные композитные материалы обладают хорошей биологической совместимостью, долговечностью, функциональностью, высокой эстетичностью благодаря развитию оптических технологий и совершенствованию физико-химических и оптических свойств материалов [11–13].

Перспективно использовать спектрофотометры для изучения оптических свойств композиционных материалов, так как эти приборы предоставляют достоверную, надежную и высокоточную информацию об исследуемом объекте.

Поэтому представляет интерес исследование влияния температуры на оптические свойства композиционных материалов при стандартном времени световой полимеризации автоматизированным спектрофотометром.

Изучение оптических параметров при отверждении в течение стандартного рекомендованного времени в различных температурных условиях автоматизированным спектрофотометром и явилось целью настоящей работы.

Постановка задачи

С помощью лабораторного спектрофотометра провести измерения образцов композитных материалов, отвержденных при разных температурах и экспозиции фотополимеризации $t = 10$ с.

Материал и методы исследования

Материалами для исследования стали светоотверждаемые супрананокompозитные материалы для прямой реставрации зубов Estelite Asteria оттенков А3.5В, А4В, В3В фирмы *Tokuyama Dental* (Япония).

Материалы оттенков А3,5В, А4В, В3В предназначены для послойного восстановления дефекта коронки зуба как на уровне дентина, так и в эмали, за исключением области режущего края, где его комбинируют с более прозрачными эмалевыми оттенками.

Материал для измерений был предоставлен ООО «Центр имплантации и комплексного лечения» (Санкт-Петербург, Россия).

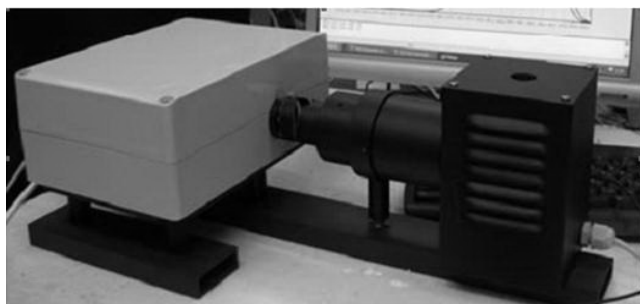
Для получения оптических свойств стоматологических образцов композитов применяли лабораторный спектрофотометр. Внешний вид прибора показан на рис. 1. Этот спектрофотометр способен решать сложные задачи как на производстве, так и в научно-исследовательских лабораториях, проводить экологический мониторинг, измерять биологические и медицинские объекты, анализировать оптические свойства дисперсных сред. Уникальность этого прибора состоит в том, что он способен проводить анализ в широком диапазоне длин волн и, в отличие от своих предшественников, имеет фотоприемные устройства, работающие в своем оптическом диапазоне. К прибору прилагаются дополнительные устройства, что расширяет область исследований.

На рис. 2 показана оптическая схема спектрофотометра.

Спектрометр построен по двухлучевой схеме с двумя фотодетекторами [2, 14].

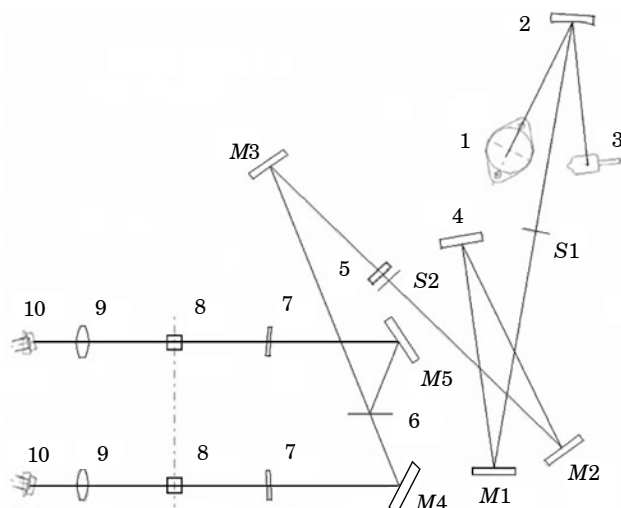
Световой пучок от источника света 1 или 3 попадает на зеркало 2 и направляется на входную щель S1. Пройдя S1, он достигает зеркала M1, далее световой пучок перенаправляется на голографическую дифракционную решетку 4. Затем пучок, отразившись от 4 и зеркала M2, достигает следующего зеркала M3, после чего от M3 доставляется на 6. Оптический затвор 6 делит пучок на объектный и опорный, и каждый из них, соответственно, направляется в свой канал измерений.

Основные технические параметры лабораторного спектрофотометра приведены в таблице.



• Рис. 1. Внешний вид лабораторного спектрофотометра

• Fig. 1. The appearance of a laboratory spectrophotometer



• Рис. 2. Оптическая схема лабораторного спектрофотометра: 1 – дейтериевая лампа; 2 – вогнутое зеркало; 3 – галогеновая лампа; S1, S2 – щели; 4 – высокополированная голографическая дифракционная решетка; M (1,..., 5) – система отражающих зеркал; 5 – светофильтр; 6 – оптический затвор; 7 – выходные окна; 8 – отделения для исследований; 9 – микрообъективы; 10 – фотозлектронные элементы

• Fig. 2. Optical scheme of the laboratory spectrophotometer: 1 – deuterium lamp; 2 – concave mirror; 3 – halogen lamp; S1, S2 – slits; 4 – highly polished holographic diffraction grating; M (1,..., 5) – reflecting mirror system; 5 – light filter; 6 – optical shutter; 7 – output windows; 8 – research compartments; 9 – micro lenses; 10 – photoelectronic elements

• Основные технические параметры лабораторного спектрофотометра

• The main technical parameters of the laboratory spectrophotometer

Показатель	Характеристика
Оптическая схема	Двухлучевая
Источник излучения	Вольфрамовая галогенная и дейтериевая лампы
Детектор	Кремниевые фотодиоды
Спектральный диапазон, нм	190–1100
Ширина щели, нм	1
Точность установки длины волны, нм	(±0,3)
Размеры, см	63×47×21
Вес, кг	26

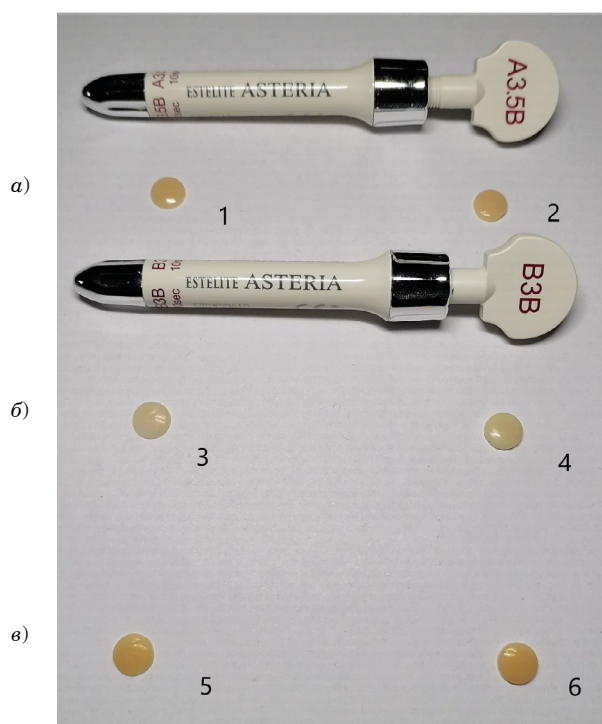
Результаты эксперимента

Для получения оптических параметров исследуемых объектов необходимо было их правильно зафиксировать в окошке объектного канала измерений. Объекты не должны были иметь

диаметры более 15 мм, а толщина их должна составлять не более 400 мкм. Поэтому материалы изготавливались в специальных контейнерах, которые придавали исследуемым образцам форму плоского диска диаметром 10 мм и толщиной 400 мкм. Материалы представленных оттенков были отверждены в различных температурных условиях ($T = 20$ и 47°C). Каждый исследуемый объект подвергался облучению светодиодной (LED) лампой, работающей в диапазоне длин волн от 400 до 500 нм, а время отверждения (экспозиции) составляло $t = 10$ с. На рис. 3 показаны объекты исследований.

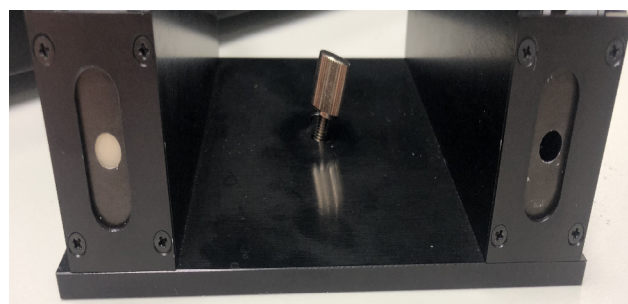
Исследуемые образцы фиксировали в металлическом окошке прижимным механизмом. Металлическое окошко с образцом устанавливали в объектном канале измерений таким образом, чтобы через центр окошка проходил световой луч, облучая образец. На рис. 4 приведено устройство каналов измерений лабораторного спектрофотометра, где показан образец в объектном канале.

Результаты измерений оптических параметров исследуемых материалов при разных температурах и времени экспозиции $t = 10$ с показаны на рис. 5.



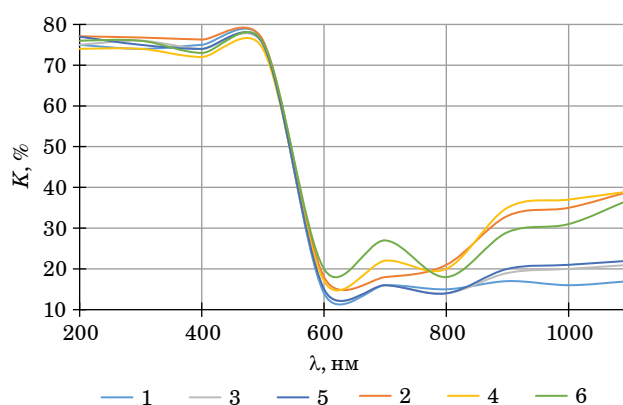
• Рис. 3 Изготовленные образцы для исследований Estelite Asteria при времени фотополимеризации $t = 10$ с: а – оттенок А3.5В: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T = 47^\circ\text{C}$; б – оттенок В3В: 3 – $T = 20^\circ\text{C}$, 4 – $T = 47^\circ\text{C}$; в – оттенок А4В: 5 – $T = 20^\circ\text{C}$, 6 – $T = 47^\circ\text{C}$

• Fig. 3. Manufactured samples for Estelite Asteria studies at a photopolymerization time $t = 10$ s: а – shade А3.5В: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T = 47^\circ\text{C}$; б – shade В3В: 3 – $T = 20^\circ\text{C}$, 4 – $T = 47^\circ\text{C}$; в – shade А4В: 5 – $T = 20^\circ\text{C}$, 6 – $T = 47^\circ\text{C}$



• Рис. 4. Устройство каналов измерения лабораторного спектрофотометра с исследуемым образцом

• Fig. 4. The device of measurement channels of a laboratory spectrophotometer with a test sample



• Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента поглощения $K(\lambda)$ образцов Estelite Asteria при экспозиции фотополимеризации $t = 10$ с. Оттенок А3.5В: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T = 47^\circ\text{C}$; оттенок В3В: 5 – $T = 20^\circ\text{C}$; 6 – $T = 47^\circ\text{C}$; оттенок А4В: 3 – $T = 20^\circ\text{C}$, 4 – $T = 47^\circ\text{C}$

• Fig. 5. Spectral dependences of the absorption coefficient $K(\lambda)$ of Estelite Asteria samples at photopolymerization exposure $t = 10$ s. Shade А3.5В: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T = 47^\circ\text{C}$; shade В3В: 5 – $T = 20^\circ\text{C}$; 6 – $T = 47^\circ\text{C}$; shade А4В: 3 – $T = 20^\circ\text{C}$, 4 – $T = 47^\circ\text{C}$

Материалы при экспозиции фотоотверждения $t = 10$ с и температурах $T = 20$ и 47°C имели распределения коэффициента поглощения от длины волны ($K(\lambda)$) на участке длин волн 200–500 нм, практически не отличающиеся друг от друга. Принципиальных отклонений кривых друг от друга на этом участке не было зафиксировано.

Что касается длинноволновой области спектра 500–1100 нм, то максимум $K(\lambda)$ определен у нагретого материала (кривые 4, 5, 6 на рис. 5). Отличие кривых на этом участке длин волн можно объяснить тем, что при нагревании материала значения колебаний связей повышаются.

Можно констатировать тот факт, что материалы Estelite Asteria оттенков А3.5В, А4В, В3В на атомно-молекулярном уровне сбалансированы очень хорошо. Удивляет тот факт, что при выполнении реставраций нагретыми композитными материалами оптическое качество реставраций не ухудшилось.

Заключение

Полученные оптические параметры композитов Estelite Asteria оттенков А3.5В, А4В, В3В, отвержденных с экспозицией фотополимеризации $t = 10$ с при различных температурах $T = 20$ и 47 °С, представляют огромный интерес для терапевтической стоматологии. Эти данные показывают, как меняется структура материала (кристаллическая решетка) и что происходит на атомно-молекулярном уровне при нагреве или

охлаждении композита. Выявлено, что при стандартизированной экспозиции фотополимеризации $t = 10$ с и температурах $T = 20$ и 47 °С материал имеет постоянное оптическое качество реставраций и сохраняет свои термодинамические и физико-механические свойства.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.
2. Тарасов К. И. Спектральные приборы. М.: Машиностроение. 1968. 389 с.
3. Князева М. А. Виды стоматологических фотополимеризационных устройств и их сравнительная характеристика // Вестн. ВГМУ. 2011. Т. 10, № 4. С. 138–147.
4. Дуглас А. Т. Возможности цвета: создание высокодиффузных слоев с композитом // Клини. стоматология. 2004. № 2. С. 4–11.
5. Исаева Т. М. Еще раз о проблеме цвета в эстетической стоматологии. Возвращаясь к технике реставрации зубов // Клини. стоматология. 2003. № 4. С. 22–24.
6. Луцкая И. К. Практическая стоматология. Минск: Бел. наука, 1999. 360 с.
7. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical engineering. 2014. Vol. 47, № 6. P. 304–306. Doi: 10.1007/s10527-014-9397-2.
8. An interferometric device for detecting subgingival caries / E. E. Maiorov [et al.] // Biomedical engineering. 2019. Vol. 53. P. 258–261. Doi: 10.1007/s10527-019-09921-0.
9. Соколовская М. В. Применение спектрофотометрического метода для исследования содержания этилового спирта в жидкофазных средах / Е. Е. Майоров [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 501–508. Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.
10. Спектральный анализ новейших стоматологических материалов для эстетики и реставраций на твердых тканях зуба / Л. И. Шаламай [и др.] // Dental Forum. 2023. № 2 (89). С. 29–33.
11. Оценка применения различных технологий адгезива химического отверждения при проникновении в дентин зуба / Л. И. Шаламай [и др.] // Dental Forum. 2023. № 3 (90). С. 29–35.
12. Абсорбционный спектральный анализ светоотверждаемых рентгеноконтрастных материалов «Омнихрома» / Л. И. Шаламай [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 781–788. Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-788.
13. Исследование новых светоотверждаемых композитных стоматологических материалов методом атомно-абсорбционной спектроскопии / Л. И. Шаламай [и др.] // Стоматология для всех. 2023. № 3 (104). С. 46–52. Doi: 10.35556/idr-2023-3(104)46-52.
14. Спектрофотометрическое исследование образцов контрольной фиксации наполнителя к шлифу зуба стоматологическим цементом / Л. И. Шаламай [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 887–894. Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-887-894.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. Fundamentals of optics. Moscow: Nauka; 1970. 855 p. (In Russ.).
2. Tarasov K. I. Spectral devices. Moscow: Mechanical engineering; 1968. 389 p. (In Russ.).
3. Knyazeva M. A. Types of dental photopolymerization devices and their comparative characteristics. Bulletin of the VSMU. 2011;10(4):138–147. (In Russ.).
4. Douglas A. T. Possibilities of color: creation of highly diffuse layers with composite. Clinical dentistry. 2004;(2):4–11. (In Russ.).
5. 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.).

6. Lutsкая I. K. Practical dentistry. Minsk: Bel. Science; 1999; 360 p.
7. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination. Biomedical engineering. 2014;47(6):304–306. (In Russ.). Doi: 10.1007/s10527-014-9397-2.
8. Maiorov E. E., Shalamay L. I., Dagaev A. V., Kirik D. I., Khokhlova M. V. An interferometric device for detecting subgingival caries. Biomedical engineering. 2019;(53):258–261. (In Russ.). Doi: 10.1007/s10527-019-09921-0.
9. Maiorov E. E., Afanasyeva O. V., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Sokolovskaya M. V. Application of the spectrophotometric method for studying the content of ethyl alcohol in liquid-phase media. Journal of instrument engineering. 2023;66(6):501–508. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.
10. Shalamai L. I., Oksas N. S., Lampusova V. B., Mendoza E. Y., Maiorov E. E. Spectral analysis of the latest dental materials for aesthetics and restorations on hard tooth tissues. Dental forum. 2023;(2(89)):29–33. (In Russ.).
11. Shalamai L. I., Oksas N. S., Lampusova V. B., Mendoza E. Yu., Maiorov E. E. Evaluation of the use of various technologies of chemical curing adhesive when penetrating into the dentin of a tooth. Dental forum. 2023;(3(90)):29–35. (In Russ.).
12. Shalamai L. I., Maiorov E. E., Mendoza E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. Absorption spectral analysis of light-cured radiopaque materials “Omnichrome”. Journal of instrument engineering. 2023;66(9):781–788. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-781-78.
13. Shalamai L. I., Mendoza E. Yu., Maiorov E. E., Lampusova V. B., Oksas N. S. Investigation of new light-curing composite dental materials by atomic absorption spectroscopy. Dentistry is for all. Int. dental review. 2023;(3(104)):46–52. (In Russ.). Doi: 10.35556/idr-2023-3 (104)46-52.
14. Shalamai L. I., Maiorov E. E., Mendoza E. Yu., Lampusova V. B., Oksas N. S. Spectrophotometric study of samples of control fixation of filler to the tooth slot with dental cement. Journal of instrument engineering. 2023;66(10):887–894. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-887-89.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Поступила в редакцию 25.01.2024

Поступила после рецензирования 02.02.2024

Принята к публикации 04.04.2024

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.

Received 25.01.2024

Revised 02.02.2024

Accepted 04.04.2024

Имитационная модель функционирования установки по производству деталей методом послойного наплавления

Ярослав Алексеевич Щеников¹

✉ yar2409@mail.ru, SPIN-код: 4905-3350

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

Аннотация. Рассматривается моделирование процесса 3D-печати как один из способов улучшения качества и эффективности данной технологии. Предварительное имитационное моделирование позволяет выявить возможные проблемы и предложить оптимальные параметры для оборудования и материалов. Результатом работы является разработка имитационной модели, которая позволяет более точно предсказать результаты печати и контролировать качество производимых реальной установкой деталей.

Ключевые слова: имитационное моделирование, аддитивные технологии, качество 3D-печати, SimInTech

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: Щеников Я. А. Имитационная модель функционирования установки по производству деталей методом послойного наплавления // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 38–43. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-38-43.

Original article

Simulation model of the functioning of an installation for the parts production using the fused deposition modeling method

Yaroslav A. Shchenikov¹

✉ yar2409@mail.ru, SPIN-code: 4905-3350

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

Abstract. The article discusses the modeling of the 3D printing process as one of the ways to improve the quality and efficiency of this technology. Preliminary simulation modeling allows you to identify possible problems and suggest optimal parameters for equipment and materials. The result of the work is the development of a simulation model that allows you to more accurately predict the results of printing and control the quality of products.

Keywords: simulation modeling, additive technologies, 3D printing quality, SimInTech

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: Shchenikov Ya. A. Simulation model of the functioning of an installation for the parts production using the fused deposition modeling method. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):38–43. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-38-43.

Введение

3D-печать является одной из самых востребованных технологий в современном мире. Она позволяет создавать объекты любой сложности и формы, что открывает множество возможностей для различных отраслей, таких как медицина, архитектура, образование, производство и многие другие. Однако одной из главных проблем, связанных с 3D-печатью, является качество полученных изделий. Факторы, такие как выбор

материала, настройка оборудования, особенности технологии и другие, могут существенно влиять на итоговый результат [1].

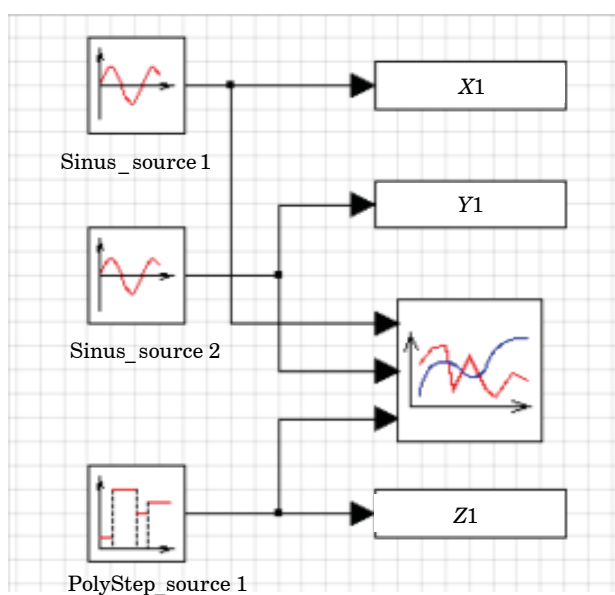
Послойный синтез композиционных материалов представляет собой процесс создания трехмерных объектов путем последовательного наложения слоев различных материалов. Это позволяет получить изделия с заданными свойствами, такими как повышенная прочность, термостойкость, химическая стойкость и т. д. Однако для успешного проведения такого про-

цесса необходимо понимать и контролировать множество параметров, влияющих на качество получаемых изделий и эффективность работы установки [2–4].

Целью исследования является разработка имитационной модели, которая позволит моделировать и анализировать различные сценарии работы установки для послойного синтеза композитов с учетом различных входных данных и условий. Такая модель дает возможность проводить исследования, направленные на оптимизацию процессов, снижение затрат и улучшение качества получаемых изделий, создавать цифровой двойник систем 3D-печати, разрабатывать киберфизические системы 3D-печати, снижающие негативное влияние человеческого фактора.

Для достижения этой цели в рамках данной работы были решены следующие задачи:

- 1) изучены принципы работы технологической установки и основные процессы, происходящие при послойном синтезе композитов;
- 2) разработана имитационная модель, описывающая динамику работы установки и взаимодействие различных компонентов;
- 3) проведен анализ полученных результатов и выявлены рациональные параметры работы установки, обеспечивающие наилучшие характеристики качества готовых изделий;
- 4) выработаны рекомендации по использованию разработанной модели и ее адаптации для конкретных задач в области послойного синтеза композиционных материалов.



• Рис. 1. Сигнал для 3D-печати фигуры Лиссажу
 • Fig. 1. Signal for 3D printing of the Lissajous figure

Выбор инструментального средства для моделирования

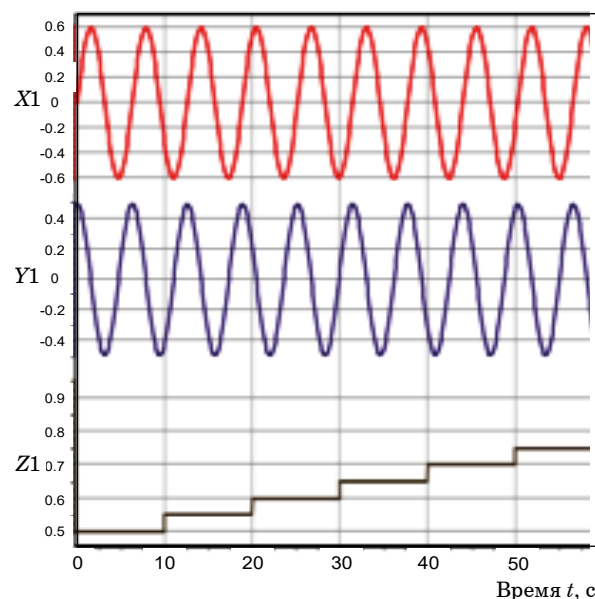
Выбор программы для имитационного моделирования зависит от множества критериев, таких как цель моделирования, сложность имитационной модели, доступность исходных данных для моделирования, удобный интерфейс пользователя, стоимость, интеграция с другими инструментами, возможность импортозамещения. Наилучшим образом вышеперечисленным критериям удовлетворяет среда программирования SimInTech [5].

Имитационная модель процесса 3D-печати

Имитационная модель процесса 3D-печати состоит из следующих элементов:

- блок-схема, состоящая из трех источников сигналов: два синусоидальных для задания движения экструдера по осям OX и OY и один кусочно-линейный сигнал для задания положения стола 3D-принтера по вертикально направленной оси OZ (рис. 1);
- скрипт, создающий и наполняющий виртуальный 3D-мир виртуальными 3D-объектами (рис. 2).

Скрипт для управления имитационной моделью (рис. 1) приведен на рис. 2. Начиная с первой строки и заканчивая строкой `Viewer3DSetCameraTarget(window_id1, object_id2)`, скрипт



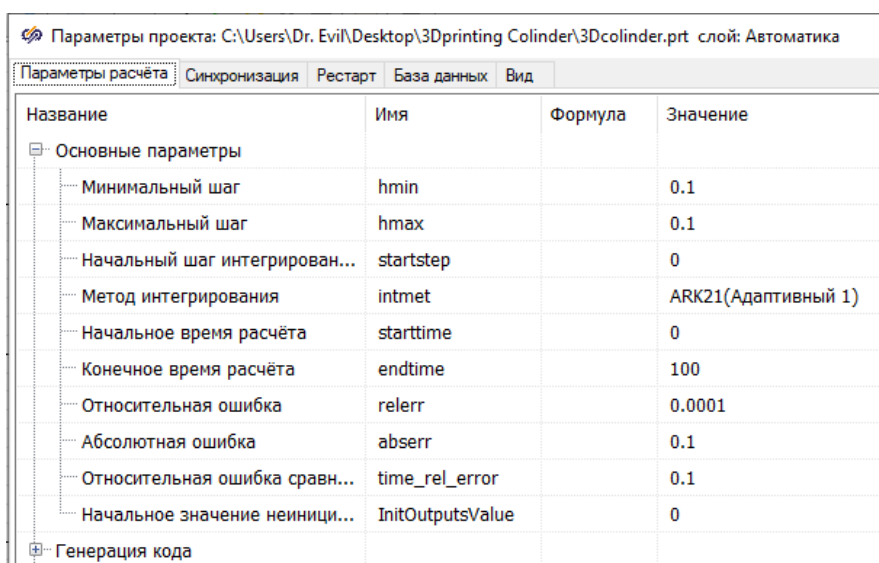
```

Initialization
    X1 = 0;
    Y1 = 0;
    Z1 = 1;
    window_id1 = Viewer3DCreate;
    //Создаем 3D-мир
    Viewer3DSetAxesVisibility(window_id1, True);
    Viewer3DSetGridVisibility(window_id1, True);
    //Убираем из 3D-мира оси и сетку
    Viewer3DSetWindowSize(window_id1, 900, 750);
    Viewer3DSetWindowPosition(window_id1, -1000, 070);
    //Устанавливаем размеры и позицию 3D-мира
    Viewer3DSetBackGround(window_id1, cl_Black, "Data\hipparcos_9.0.stars");
    //Делаем фон в виде звезд
    object_id2 = Viewer3DPlotObject(window_id1, 0, 0, [0, 0, 0], 1);
    Viewer3DSetCameraTarget(window_id1, object_id2);
end;
    Viewer3DSetObjectPosition(window_id1, object_id2, [X1, Y1, Z1]);
    Viewer3DPlotObject(window_id1, 0, 0, [X1, Y1, Z1-0.5], 0.1);
    
```

- *Рис. 2. Скрипт, управляющий имитационной моделью процесса 3D-печати*
- *Fig. 2. The script controlling the simulation model of the 3D printing process*

- *Параметры блоков, приведенных на рис. 1*
- *The parameters of the blocks shown on fig. 1*

Блок	Название	Имя	Значение
Sinus_source1	Амплитуда	a	[0.6]
	Частота	w	[1]
	Фаза	f	[0]
Sinus_source2	Амплитуда	a	[0.5]
	Частота	w	[1]
	Фаза	f	[pi/2]
PolyStep_source1	Массив временных интервалов	t	[[10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10]]
	Массив значений	y	[[0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95]]

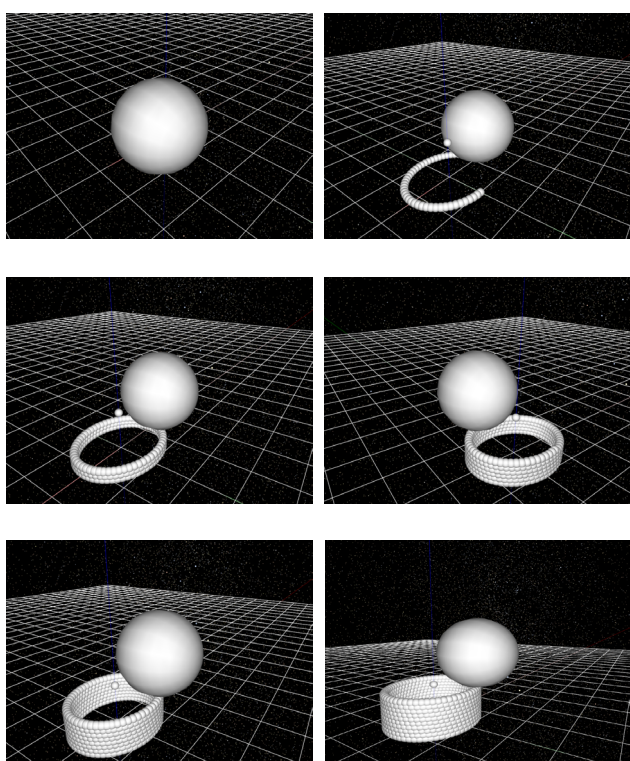


- *Рис. 3. Параметры расчета имитационной модели, приведенной на рис. 1*
- *Fig. 3. Calculation parameters of the simulation model shown on figure 1*

содержит код, управляющий инициализацией управляемой имитационной моделью процесса 3D-печати. Само перемещение экструдера 3D-принтера обеспечивается введением в скрипт строки `Viewer3DSetObjectPosition...`, координаты $X1, Y1, Z1$ в которой поступают из блок-схемы (рис. 1).

Параметры блоков, показанных на рис. 1, приведены в таблице; параметры моделирования проекта – на рис. 3.

Результаты 3D-визуализации имитационного моделирования процесса 3D-печати приведены на рис. 4.



• Рис. 4. Результаты 3D-визуализации процесса 3D-печати

• Fig. 4. Results of 3D printing process' 3D visualization

Проблемы имитационного моделирования

В результате моделирования был выявлен ряд проблем применения среды SimInTech для имитационного моделирования процесса 3D-печати:

- зависимость состава библиотеки 3D-объектов от версии SimInTech – современные версии не содержат блоки 3D-объектов старых версий;

- с увеличением числа элементов 3D-мира скорость моделирования и визуализации процесса замедляется – для моделирования печати сложных деталей может потребоваться применение мощных компьютеров;

- в проведенном исследовании производилась 3D-визуализация процесса 3D-печати несложных объектов, генерируемых на уровне сигналов, в частности, достаточно просто реализовать 3D-визуализацию фигур Лиссажу. Для визуализации более сложных 3D-моделей возникает необходимость в разработке преобразователя (парсера) из G-кода 3D-модели в трехмерный временной ряд, подаваемый на входы $X1, Y1, Z1$ имитационной модели 3D-принтера.

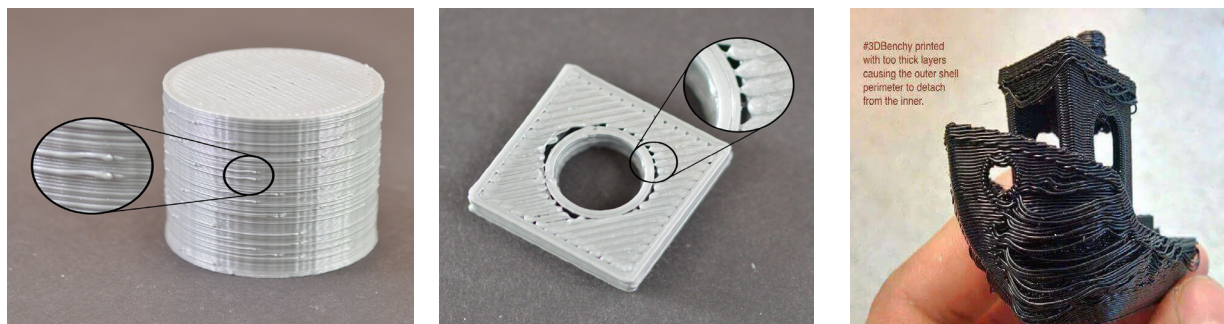
Рекомендации по использованию разработанной имитационной модели процесса 3D-печати

В современной интерпретации разработанная имитационная модель процесса 3D-печати представляет собой цифровой двойник 3D-принтера, которую можно использовать для:

- виртуальной визуализации процесса 3D-печати как в реальном времени, так и ускоренном, без расхода филамента;

- изучения внешних влияния помех – ударов, вибрации, колебаний температуры, воздуха и т. п. – на качество получаемой 3D-модели (рис. 5);

- совершенствования работы киберфизической системы, которой в действительности явля-



• Рис. 5. Брак 3D-печати, вызванный различными помехами

• Fig. 5. 3D printing defects caused by various interference

ется 3D-принтер, например, за счет внедрения дополнительных датчиков, позволяющих минимизировать контроль со стороны человека-оператора.

Заключение

Разработка алгоритма моделирования 3D-печати является важным шагом в улучшении качества и эффективности этого процесса. Алгоритм должен учитывать различные параметры, такие как тип материала, скорость печати, температура сопла и окружающей среды, а также свойства поверхности рабочего стола.

Моделирование позволяет обосновать выбор квазиоптимальных параметров для разных типов материалов и условий печати, что может существенно повысить качество готовых изделий 3D-печати [6–8].

Применение имитационной модели процесса 3D-печати может стать важным шагом в развитии технологии печати и позволит более точно предсказывать результаты печати, выбирать оптимальные режимы работы оборудования, тем самым значительно повысить качество производимых изделий, что, в свою очередь, способствует расширению сфер применения 3D-печати и увеличению ее популярности в различных отраслях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A review and reflection on part quality improvement of fused deposition modelled parts / A. Equbal [et al.] // IOP conference series: materials science and engineering. 2018. Vol. 455, № 1. P. 012072. Doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012072.
2. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters / R. Kristiawan [et al.] // Open engineering. 2021. № 11. P. 639–649. Doi: 10.1515/eng-2021-0063.
3. Blaj M., Oancea G. Fused deposition modelling process: a literature review. IOP conference series: materials science and engineering. 2021. Vol. 1009, № 1. P. 012006. Doi: 10.1088/1757-899X/1009/1/012006.
4. Process modeling for fused deposition modeling additive manufacturing / B. C. Zhang, X. Wang, Y. Li, S. Y. Lee // The International journal of advanced manufacturing technology. 2016. Vol. 85, № 5–8. P. 1059–1070.
5. Simintech. Simulation in technic. URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 03.02.2024).
6. Alam N., Alam M., Ahmad S. Optimization of fused deposition modelling process parameters using teaching learning based optimization (TLBO) algorithm. IOP conference series: materials science and engineering. 2021. Vol. 1149, № 1. P. 012014. Doi: 10.1088/1757-899X/1149/1/012014.
7. Reducing circularity error by optimizing the operating parameters in fused deposition modeling using genetic algorithm / G. Naresh [et al.] // IOP conference series: materials science and engineering. 2020. Vol. 993, № 1. P. 012151. Doi: 10.1088/1757-899X/993/1/012151.
8. Optimization of process parameters in 3D printing-fused deposition modeling using taguchi method / M. Sumalatha, J. N. Malleswara, J. N. Rao, B. Supraja Reddy // IOP conference series: materials science and engineering. 2021. Vol. 1112, № 1. P. 012009. Doi: 10.1088/1757-899X/1112/1/012009.

REFERENCES

1. Equbal A., Equbal Md. A., Sood A. K. et al. A review and reflection on part quality improvement of fused deposition modelled parts. IOP conference series: materials science and engineering. 2018;455(1):012072. Doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012072.
2. Kristiawan R., Imaduddin F., Ariawan D., Sabino U., Arifin Z. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. Open engineering. 2021;(11):639–649. Doi: 10.1515/eng-2021-0063.
3. Blaj M., Oancea G. Fused deposition modelling process: a literature review. IOP conference series: materials science and engineering. 2021;1009(1):012006. Doi: 10.1088/1757-899X/1009/1/012006.
4. Zhang B. C., Wang X., Li Y., Lee S. Y. Process modeling for fused deposition modeling additive manufacturing. The International journal of advanced manufacturing technology. 2016;85(5-8):1059–1070.
5. Simintech. Simulation in technic. Available from: <https://simintech.ru/> (Accessed 03 February 2024).
6. Alam N., Alam M., Ahmad S. Optimization of fused deposition modelling process parameters using teaching learning based optimization (TLBO) algorithm. IOP conference series: materials science and engineering. 2021;1149(1):012014. Doi: 10.1088/1757-899X/1149/1/012014.

7. Naresh G., Subramanian V., Palanivendhan M. et al. Reducing circularity error by optimizing the operating parameters in fused deposition modeling using genetic algorithm. IOP Conference series: materials science and engineering. 2020; 993(1):012151. Doi: 10.1088/1757-899X/993/1/012151.
8. Sumalatha M., Malleswara Rao J. N., Supraja Reddy B. Optimization of process parameters in 3D printing-fused deposition modeling using taguchi method. IOP conference series: materials science and engineering. 2021;1112(1):012009. Doi: 10.1088/1757-899X/1112/1/012009.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Щеников Ярослав Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – Индустрия 5.0, модели и технологии автоматизации и роботизации процессов в приборостроении.

Поступила в редакцию 06.02.2024

Поступила после рецензирования 19.02.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Shchenikov Yaroslav 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 – Industry 5.0, models and technologies of automation and robotization processes in instrumentation.

Received 06.02.2024

Revised 19.02.2024

Accepted 04.04.2024

Разработка комплексной сканирующей системы для определения дефектов формы

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. Рассматривается вопрос применения триплексного (мультисенсорного) датчика емкостно-оптически-вихретокового типа, имеющего предварительную систему преобразования, который был использован как альтернатива контактного щупа на кругломере RoundTestRA-120p [1]. Процесс снятия данных с детали на приборе для измерения дефектов формы имеет ряд сложностей, связанных с длительной калибровкой, влиянием коэффициента усиления, долгой предварительной калибровкой прибора, невозможностью использования прибора для деталей большого диаметра и большого веса. Подобранные характеристики триплексного датчика позволили использовать его вместо контактного щупа при измерении дефектов формы детали для разных материалов. Именно в бесконтактном измерении разных материалов заключается преимущество триплексного датчика.

Ключевые слова: триплексная система, вихретоковый датчик, оптический лазерный датчик, анализ дефектов детали

Для цитирования: Епифанцев К. В. Разработка комплексной сканирующей системы для определения дефектов формы // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 44–52. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-44-52.

Original article

Development of a comprehensive scanning system for detecting shape defects

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. The article considers the issue of using a triplex (multi-sensor) sensor of a capacitive-optical-eddy current type with a preliminary conversion system, which was used as an alternative to a contact probe on the RoundTestRA-120p [1]. The process of removing data from a part on a device for measuring shape defects has a number of difficulties associated with prolonged calibration, the influence of the force coefficient, long pre-calibration of the device, the inability to use the device for parts of large diameter and heavy weight. The selected characteristics of the triplex sensor made it possible to use it instead of a contact probe when measuring defects in the shape of a part for different materials. The advantage of a triplex sensor lies precisely in the non-contact measurement of different materials.

Keywords: triplex system, eddy current sensor, optical laser sensor, part defect analysis

For citation: Epifantsev K. V. Development of a comprehensive scanning system for detecting shape defects. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):44–52. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-44-52.

В условиях импортозамещения многие приборы нуждаются в замене наиболее изнашиваемых компонентов, таких как контактные щупы, подшипники, кронштейны и т. д. В современных условиях по причине увеличения производственных мощностей предприятий повышается объем контролируемых деталей, такие элементы, как контактные щупы, изнашиваются более активно, также в более активном режиме происходит износ и других механизмов. Также увеличилась и номенклатура деталей, включающая в себя множество достаточно габаритных деталей, которые необходимо измерять непосредственно в патроне станка, по причине их больших массогабаритных

свойств; многие детали большой массы и диаметра (более 20 см) нельзя установить на кругломер RoundTest. В качестве эталона по центрированию будет выбран идеальный цилиндр с нулевым биением и круглостью. Разность между эталонным значением и деталью после токарной обработки будет вычислена программой, что позволит экономить время при калибровке прибора. Сейчас на калибровку прибора для одной детали оператор тратит в среднем 8–14 мин.

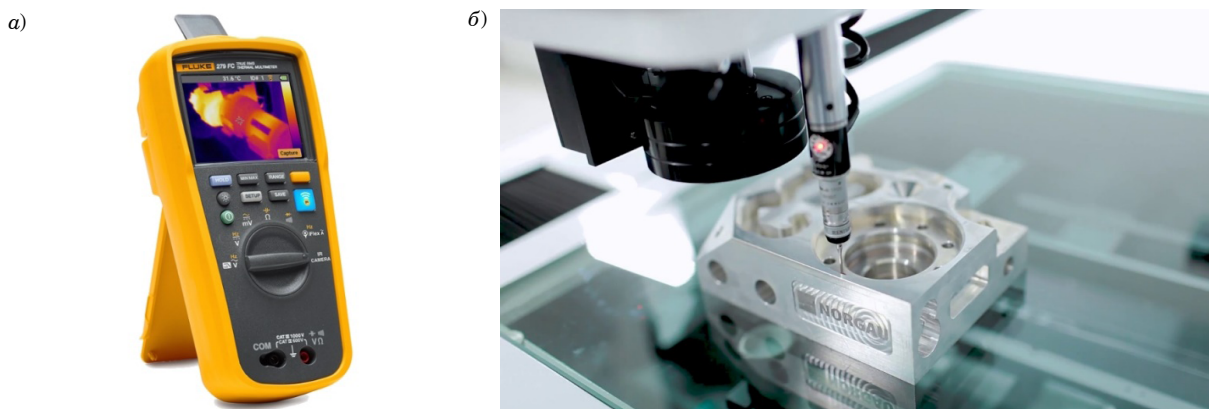
Производители современного оборудования стремятся создать универсальные машины и приборы, используя в корпусе одного прибора несколько подвидов измерительных технологий.

Примеру этого служат мультиметры, используемые как для измерения температуры, так и для измерения тока, термогигрометры, которые, помимо температуры, измеряют и влажность. Мультиметры-тепловизоры также являются мультисенсорной системой (рис. 1).

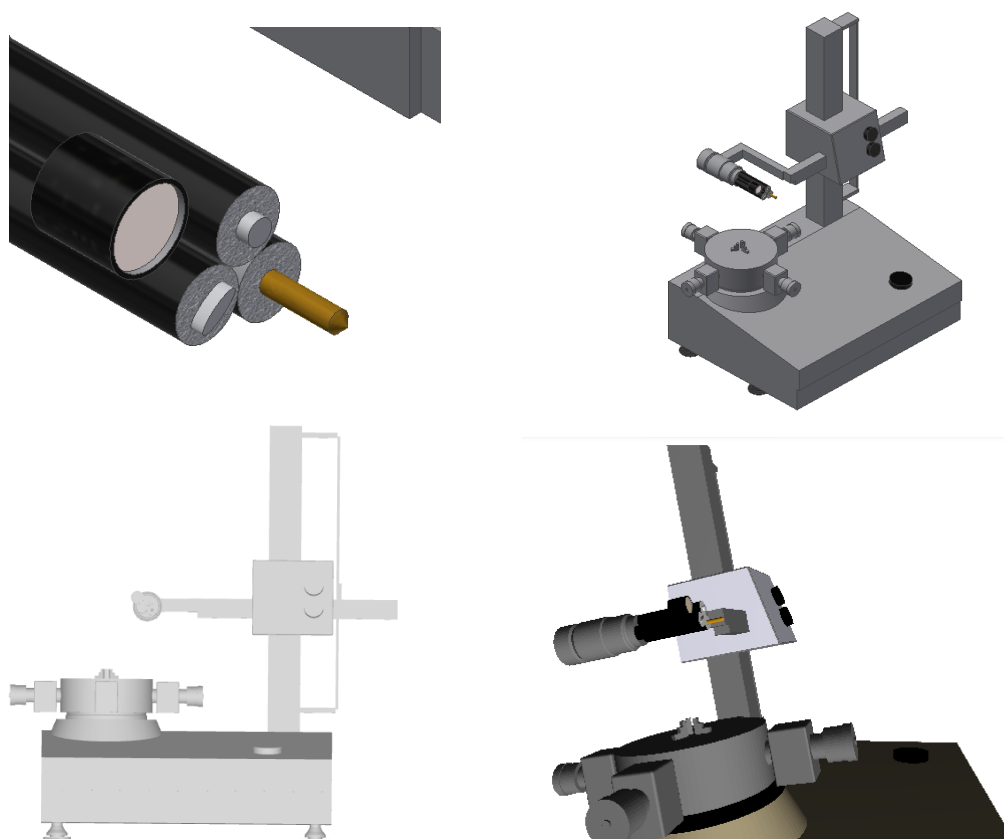
Представленный в данном исследовании прибор будет использован не только как кругломер, но и, благодаря использованию датчиков, может

применяться как дефектоскоп для определения ряда дефектов материала, связанных с выявлением микротрещин, коррозии, других критичных свойств.

Основная цель работы – создать прототип бесконтактного триплексного датчика для измерения дефектов формы для импортозамещения контактного щупа английского производства (рис. 2).



• Рис. 1. Стандартный тип мультиметра-тепловизора Fluke 279 FC (а) и мультисенсорного видеоконтактного сканера – видеоизмерительной мультисенсорной машины (б)
 • Fig. 1. Standard type of Fluke 279 FC thermal imager multimeter (a) and multi-sensor video contact scanner – video measuring multi-sensor machine (b)



• Рис. 2. Пример триплексного щупа и разработанная конструкция кругломера
 • Fig. 2. An example of a triplex probe and the developed design of a round gauge

Применение в качестве измерителя модулированного дальномера дало возможность исключить погрешность за счет алиасинга. Измерение детали производилось на поворотном столе, однако исследования показали нелинейную зависимость при измерении микрометрических долей приближения относительно угла поворота фазы. В качестве датчика была выбрана мультисенсорная система, имеющая в своем составе лазерный триангулятор, датчик вихретокового типа и емкостной тип считывателя. С этой целью были проведены измерения в Институте проблем управления сложными системами Российской академии наук на одновитковом вихретоковом преобразователе. В качестве подвижного устройства был выбран индикатор частоты, доработанный с пластинчатым двухмиллиметровым прямоугольным щупом, имитировавшим деталь. Задача была сведена к измерению зависимости индуктивности от смещения на микрометрическое расстояние, что позволило увидеть зависимость смещения от индуктивности. На рис. 3–5 графически показаны методы функционирования каждого щупа, вместе составляющие мультисенсорный или триплексный щуп.

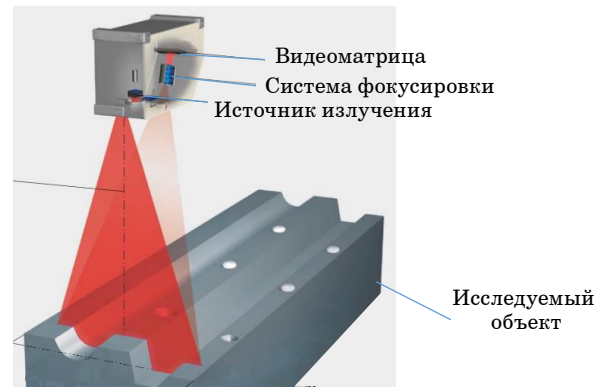
В исследовании [2] представлен лазерный кругломер О. А. Заякина, который был взят за прототип. На рис. 3 продемонстрирован принцип работы первого датчика на основе лазера.

Аналогов прибора, в котором сочетались бы три щупа, мы не нашли. Проведенный анализ литературных данных показал, что существуют наиболее популярные образцы кругломеров фирм *Mahr*, *Mitytojo* и *Taylor Hobson* контактного метода с применением щупа, который передает микроколебания ответному индуктивному датчику. Однако в нашем случае нужны были эксклюзивные образцы оборудования с вихретоковым или лазерным щупом для сканирования вращающейся детали. Вихретоковому датчику посвящена одна статья, опубликованная в 2005 г. [11].

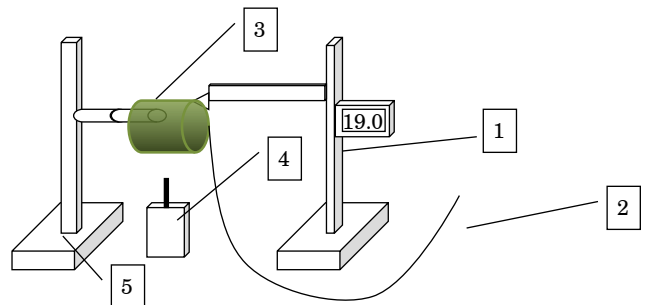
Авторы исследования [11] подчеркивают, что вихретоковый анализ физико-механических свойств поверхностных слоев при мониторинге шлифования – новый вид приборных методов. Далее рассмотрим пример применения лазерного кругломера самарским ученым О. А. Заякиным (лазерный кругломер О. А. Заякина) (рис. 7).

Программа, которая описывает работу кругломера, написана в 2001 г., но работает до сих пор – испытания проходили в ноябре 2023 г. (рис. 8).

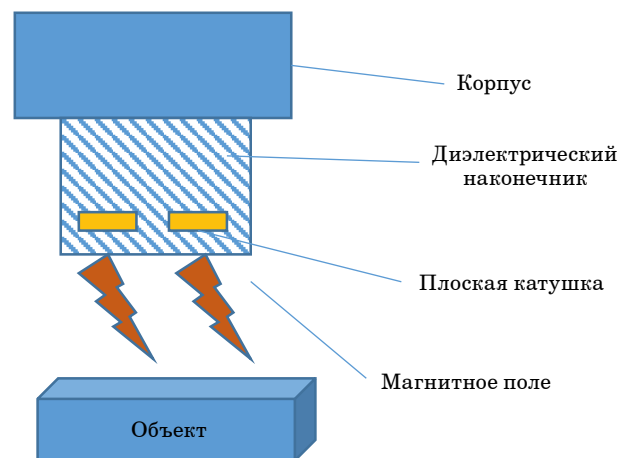
За прототип сканирующей системы для третьего типа щупа – емкостного – были взяты работы Н. С. Пщелко [6–8], в которых описано применение вихретокового датчика для обнаруже-



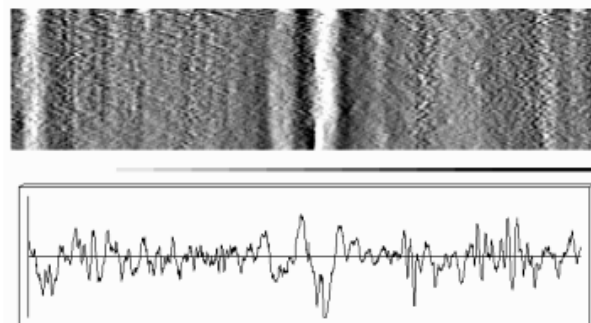
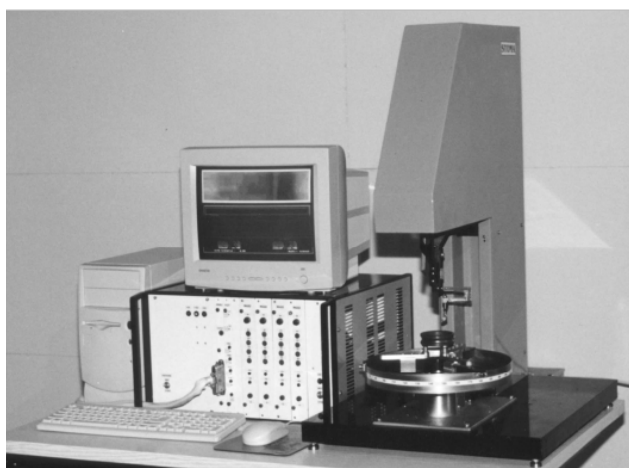
• Рис. 3. Принцип работы лазерного триангулятора (дальномера)
 • Fig. 3. The principle of operation of the laser triangulator (rangefinder)



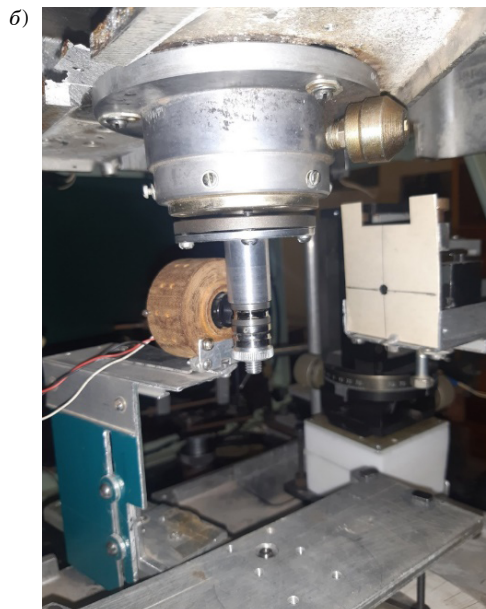
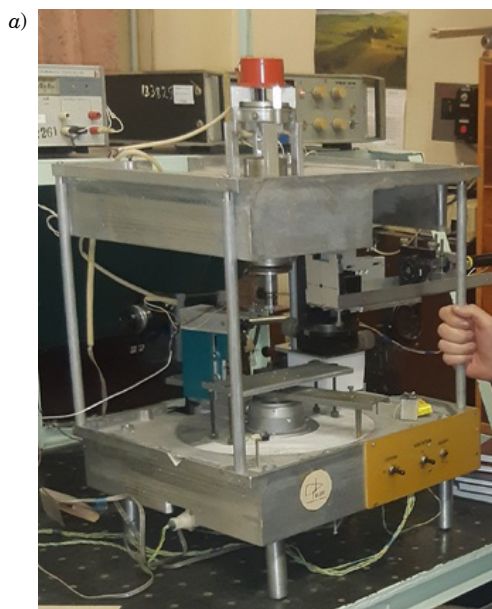
• Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 – штатив-генрейсмас; 2 – провода к осциллографу или частотомеру с отрицательным и положительным сигналом; 3 – контролируемая деталь на консоли; 4 – емкостный датчик с латунным щупом; 5 – стойка с контролируемой высотой консоли
 • Fig. 4. Experimental setup: 1 – tripod; 2 – wires to an oscilloscope or frequency meter with a negative and positive signal; 3 – controlled part on the console; 4 – a capacitive sensor with a brass probe; 5 – rack with a controlled console height



• Рис. 5. Пример работы вихретокового датчика
 • Fig. 5. An example of the operation of an eddy current sensor



• Рис. 6. Кругломер для обнаружения дефектов шлифования колец подшипников вихретоковым методом и программа оценки дефекта
 • Fig. 6. A round gauge for detecting defects in grinding bearing rings by the eddy current method and a defect assessment program



• Рис. 7. Лазерный кругломер О. А. Заякина (а); сканирующая головка и деталь, подвешенная к вращающемуся механизму (кольцо подшипника) (б)
 • Fig. 7. Zayakin's laser round gauge (a); a scanning head and a part suspended from a rotating mechanism (bearing ring) (b)

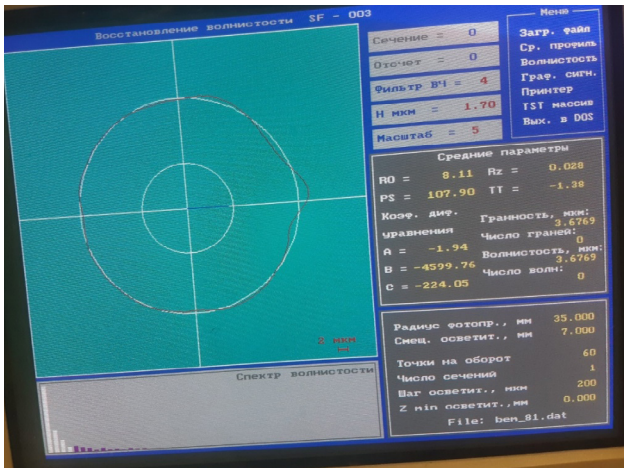
ния микрорасстояний, но с определенным видом фильтрации.

На рис. 9 показано, что точка координат на графике C_m и d_m является некоторой точкой экстремума функции, больше которой начинаются экспоненциальный подъем графика и плавный переход в ровную линию, что свидетельствует о некотором расстоянии, при котором датчик уже перестает улавливать приближение объекта (рис. 9).

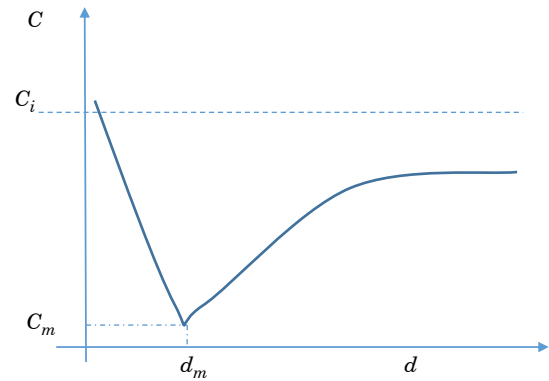
На рис. 9 до точки, как отмечают авторы [7, 8], участок от 0 до dm – «короткодействующий»,

он улавливает микросмещения (в изготовленном макете – около 1 мм). Возрастание емкости при увеличении расстояния между пластинами (объектом и щупом) также доказано в трудах [7, 8], в которых рассматривается вопрос разработки датчика индуктивности с характеристиками, показанными на рис. 10.

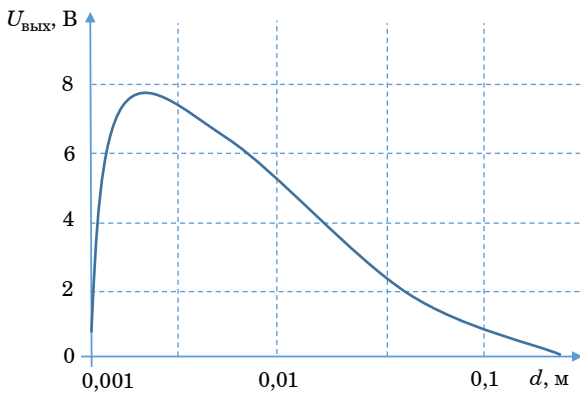
В разработке, описанной нами и сделанной с учетом вышеприведенных прототипов, был использован компонентный состав и генератор 8 МГц (рис. 11). Из рассмотренных выше разработок была интегрирована система



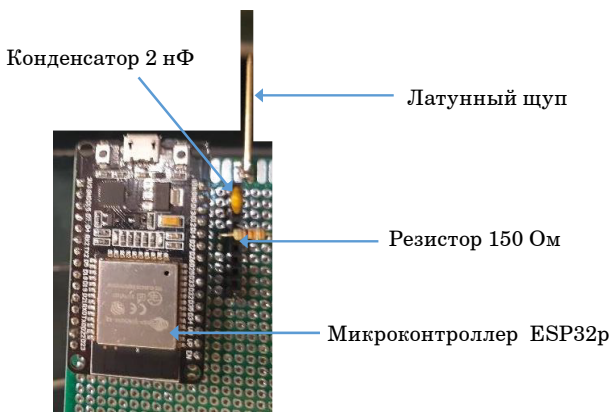
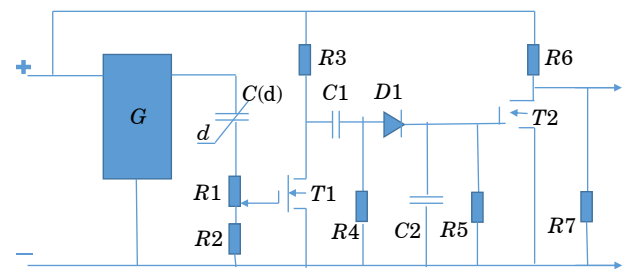
• Рис. 8. Программа оценки дефекта кругломера
 О. А. Заякина
 • Fig. 8. Zayakin's kruglomer defect evaluation program



• Рис. 9. Зависимость емкости чувствительного элемента датчика от расстояния между наблюдаемым объектом и поверхностью чувствительного датчика
 • Fig. 9. Dependence of the capacitance of the sensor element on the distance between the observed object and the surface of the sensor



• Рис. 10. Зависимость выходного сигнала датчика от расстояния до металлической детали и схема реализации
 • Fig. 10. Dependence of the sensor output signal on the distance to the metal part and the implementation scheme



• Рис. 11. Емкостной щуп А. Э. Егорова
 • Fig. 11. Egorov's capacitive probe

шумоподавления, которая уменьшила процесс стабилизации при измерении частоты. Нами совместно с сотрудниками кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного

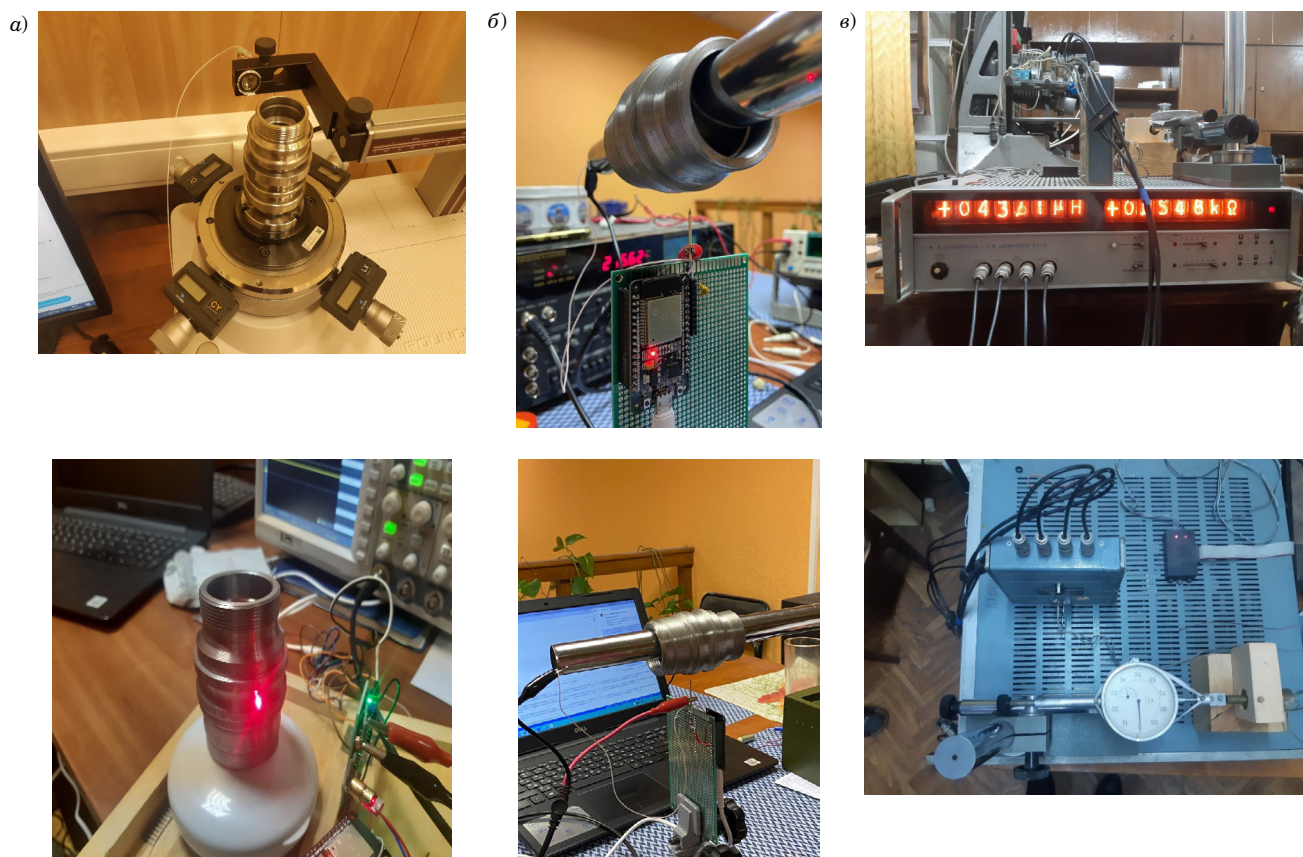
университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) был разработан следующий щуп (рис. 11).

За значительный промежуток времени, более двух лет, были испытаны все типы щупов, которые и должны составить прототип триплексного щупа (рис. 12).

На рис. 12, на осциллографе, показаны скачки осциллограммы, которые были зарегистрированы при микросмещении винта и приближении линзы/емкостного/вихретокового датчика к металлической детали. На рис. 13 приведены результаты измерения на датчиках, перечисленные на рис. 12.

Разработка представляет собой импортозамещенный комплексный датчик, который может быть использован не только для кругломеров, но и, при тщательной фильтрации, для измерения контура и шероховатости [3].

В процессе проведения исследования было выявлено, что триплексный щуп должен



• Рис. 12. Испытания с различными типами щупов: а – оптический датчик с осциллографом и анализатором спектра; б – емкостный датчик с частотомером и вольтметром; в – вихрековый датчик с LCR-метром
 • Fig. 12. Tests with various types of probes: а – optical sensor with an oscilloscope and a spectrum analyzer; б – capacitive sensor with a frequency meter and a voltmeter; в – eddy current sensor with an LCR meter

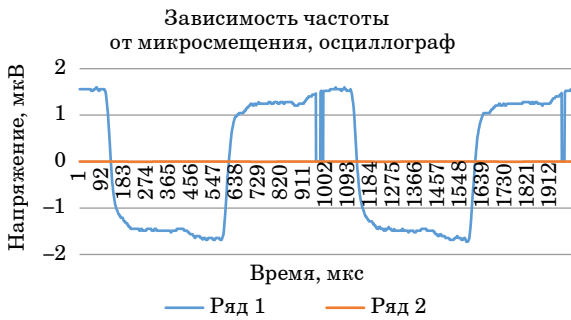
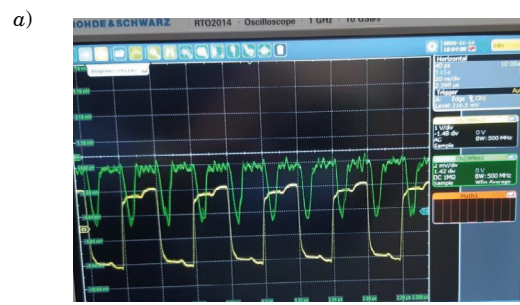
иметь ряд высокопроизводительных фильтров для аппроксимации сигнала и борьбы с алиасингом. В работах [4–6] отмечена зависимость между емкостью и расстоянием наблюдаемого объекта, показанная на рис. 14. Анализируя представленный график, можно также сделать вывод, что есть некоторый выход датчика на режим (стабилизацию, происходящую из-за сопротивления датчика шумам), сопровождающийся резким увеличением емкости в момент минимального расстояния между наблюдаемым объектом и второй пластиной конденсатора (исследуемым объектом).

При приближении посторонних контролируемых элементов к рабочему электроду изменяется пространственная картина распределения электромагнитного поля, что ведет к изменению емкости рабочего электрода. Однако при изменении влажности также может произойти изменение емкости, что может привести к погрешностям. Как отмечено в [9, 10], необходимо применить блок коррекции.

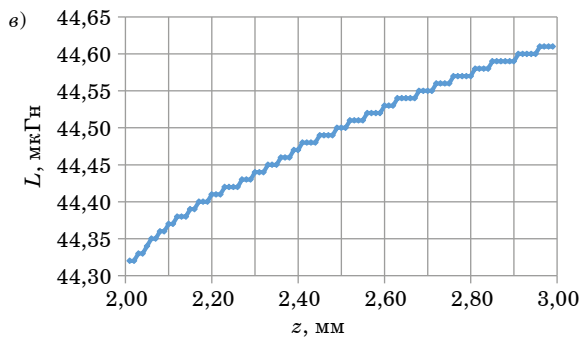
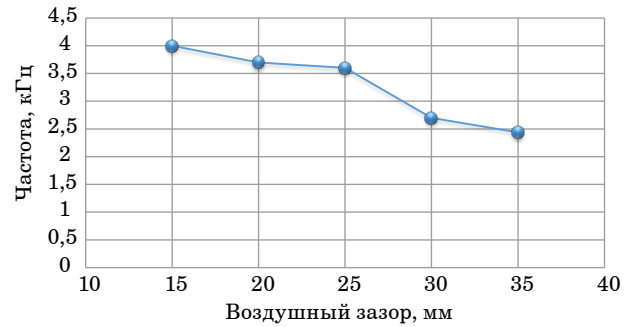
При использовании цепи емкостной коррекции изменение емкости рабочего электро-

да также вызывает изменение напряжения на выходе устройства выборки хранения. В настоящее время триплексный щуп тестируется, и ожидается, что в скором времени будет иметь промышленное применение. Важно сказать, что применение подобного триплексного щупа невозможно без ряда программных продуктов, которые будут адаптировать сигнал. За два года в ГУАП были разработаны программы для ЭВМ [12, 15], которые используются для преобразования сигналов в графические модули. Представленный программный продукт в комплекте с прибором – вращающимся столом с установленной деталью – и штативом с закрепленным лазером позволяет производить преобразование Фурье с входных сигналов, которые при отражении от объекта улавливает светоприемное устройство лазера. Данный анализ позволяет дополнительно снижать помехи, создаваемые естественным освещением, теньевыми эффектами.

Программа в комплексе с преобразованием Фурье позволяет выводить на экран персонального компьютера результаты фильтрованного ус-

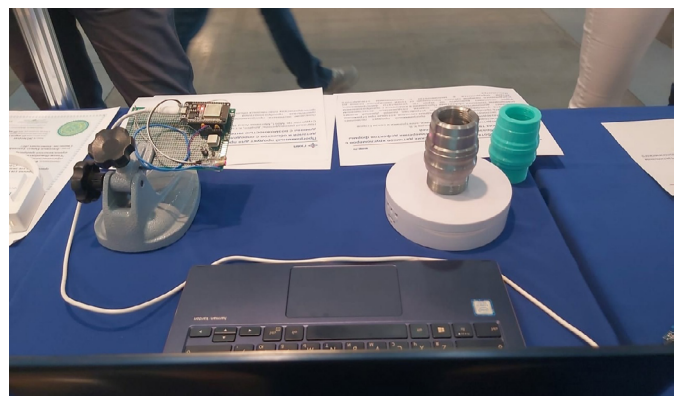
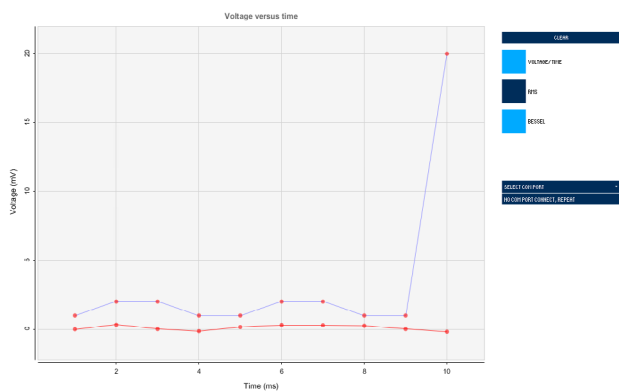


б) Зависимость частоты от воздушного зазора, кГц/мм



• Рис. 13. Графические результаты после испытаний с различными типами щупов: а – оптический датчик с осциллографом и анализатором спектра; б – емкостный датчик с частотомером и вольтметром; в – вихретоковый датчик с LCR-метром

• Fig. 13. Graphical results after testing with various types of probes: а – optical sensor with an oscilloscope and a spectrum analyzer; б – capacitive sensor with a frequency meter and a voltmeter; в – eddy current sensor with an LCR meter



• Рис. 14. Разработанная программа и образец на выставке «Хайтек – 2023» от ГУАП

• Fig. 14. The developed program and sample at the exhibition “Hi-Tech – 2023” from SUAI

редненного лазером сигнала о дефекте формы детали и выявлять его (речь идет о таких дефектах, как конусообразность, седлообразность, биение).

Расстояние от точки нахождения лазера до детали определяется в милливольтках с применением стандартного мультиметра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.* Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 104 с.
2. *Заякин О. А., Манухин А. В., Ростов А. А.* Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной погрешности // Известия Самар. науч. центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 6. С. 184–188.
3. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К. В. Епифанцев, Г. А. Петров, В. Н. Белопухов, О. А. Заякин // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 63–76. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-63-76.
4. *Кулманаков Д. С., Пщелко Н. С., Костовский И. П.* Многофункциональный емкостной датчик // Наука настоящего и будущего. 2020. Т. 1, № 2. С. 122–125.
5. *Пщелко Н. С., Соколова И. М., Чигирев Д. А.* Бесконтактный многофункциональный датчик на основе планарного конденсатора // Техника радиосвязи. 2021. № 3 (50). С. 71–82.
6. Св-во о регистрации программы для ЭВМ RU 2016610272. Программа для контроля параметров емкостных структур методом вольт-фарадных характеристик / Т. Р. Акчурина, Н. С. Пщелко, Е. Г. Водкайло. 11.01.2016. Заявка № 2015660773 от 10.11.2015.
7. *Novak J. L., Feddema I. T.* A capacitance-based proximity sensor for whole arm obstacle avoidance // Proceedings 1992 IEEE International conference on robotics and automation. IEEE, 1992. P. 1307–1314.
8. *Пщелко Н. С.* Многофункциональный датчик на основе планарного конденсатора для дистанционного зондирования // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: Тезисы докл. I Рос. науч. конф. Омск, 2020. С. 95–96.
9. *Ballas G., Rüdiger W. B. H.* Tip deflection measurement – inductive sensor principle chapter // · Modeling of electromechanical systems. 2007.
10. *Галков А. В., Якунин А. Г.* К вопросу о разработке адаптивных охранных систем на основе емкостных датчиков // Вестн. Алтай. гос. аграр. ун-та. 2018. № 1 (17) С. 121–125
11. Автоматизированная система вихретокового контроля деталей подшипников / А. А. Игнатъев, В. В. Горбунов, С. И. Зайцев, С. А. Игнатъев // Вестн. СГТУ. 2005. № 2 (7). С. 1–9.
12. Св-во о регистрации государственной программы на ЭВМ № 2023612860. Программа для визуализации и подсчета результатов измерения дефектов формы цилиндрических твердотельных деталей оптическими методами / К. В. Епифанцев, А. Э. Егоров. 08.02.2023.
13. Св-во о регистрации государственной программы на ЭВМ № 2023616324. Программа обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью преобразования Фурье для измерения дефектов формы цилиндрических твердотельных деталей / К. В. Епифанцев, А. Э. Егоров. 24.03.2023.
14. Св-во о регистрации государственной программы на ЭВМ № 2023664436. Программа обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью функции Бесселя для измерения дефектов формы, месторасположения и биения / К. В. Епифанцев, А. Э. Егоров. 05.07.2023.
15. Св-во о регистрации государственной программы на ЭВМ № 2024611413. Программа для адаптации измерений дефектов формы при преобразовании частотных и емкостных параметров электрической цепи / К. В. Епифанцев, А. Э. Егоров. 22.01.2024.

REFERENCES

1. Gushchina E. A., Epifantsev K. V., Efremov N. Yu. Digital metrology: studies-method. handbook. SPb.: SUAI; 2022. 104 p. (In Russ.).
2. Zayakin O. A., Manukhin A. V., Rostov A. A. Experimental laser round meter, basic error study. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017;19(6):184–188. (In Russ.).
3. Epifantsev K. V., Petrov G. A., Belopukhov V. N., Zayakin O. A. Investigation of the possibility of using a single-turn eddy current sensor to measure shape defects. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;3(1):63–76. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2024-1-63-76.

4. Kulmanakov D. S., Pshchelko N. S., Kostovsky I. P. Multifunctional capacitive sensor. The science of the present and the future. 2020;1(2):122–125. (In Russ.).
5. Pschelko N. S., Sokolova I. M., Chigirev D. A. Contactless multifunctional sensor based on a planar capacitor. Radio communication technology. 2021;3(50):71–82. (In Russ.).
6. Certificate of registration of the computer program RU 2016610272. Program for monitoring parameters of capacitive structures by the method of volt-farad characteristics; T. R. Akchurin, N. S. Pschelko, E. G. Vodkailo. 11.01.2016. Application No. 2015660773. 11.10.2015. (In Russ.).
7. Novak J. L., Feddema I. T. A capacity-based proximity sensor for whole arm obstacle avoidance. Proceedings 1992 IEEE International conference on robotics and automation. IEEE, 1992; pp. 1307–1314.
8. Pschelko N. S. Multifunctional sensor based on a planar capacitor for remote sensing. Radiophysics, photonics and the study of the properties of matter: Abstracts of the I Russian scientific conference. Omsk; 2020, pp. 95–96. (In Russ.).
9. Ballas G., Rüdiger W. B. H. Tip deflection measurement – inductive sensor principle chapter. Modeling of electromechanical systems. 2007.
10. Galkov A. V., Yakunin A. G. On the development of adaptive security systems based on capacitive sensors. Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2018;1(17):121–125. (In Russ.).
11. Ignatiev A. A., Gorbunov V. V., Zaitsev S. I., Ignatiev S. A. Automated eddy current control system for bearing parts. Bulletin of the SSTU. 2005;2(7):1–9. (In Russ.).
12. Certificate of registration of the state computer program no. 2023612860. Program for visualization and calculation of measurement results of defects in the shape of cylindrical solid-state parts by optical methods; K. V. Epifantsev, A. E. Egorov. 08.02.2023. (In Russ.).
13. Certificate of registration of the state computer program no. 2023616324. Program for processing signals of optical sensors of round meters using Fourier transform for measuring defects in the shape of cylindrical solid-state parts; K. V. Epifantsev, A. E. Egorov. 24.03.2023. (In Russ.).
14. Certificate of registration of the state computer program no. 2023664436. Program for processing signals of optical sensors of round meters using the Bessel function for measuring defects in shape, location and runout; K. V. Epifantsev, A. E. Egorov. 05.07.2023. (In Russ.).
15. Certificate of registration of the state computer program no. 2024611413. Program for adapting measurements of shape defects during conversion of frequency and capacitive parameters of an electric circuit; K. V. Epifantsev, A. E. Egorov. 22.01.2024. (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 – измерение дефектов формы, лазерные триангуляторы, развитие профессиональных компетенций.

Поступила в редакцию 24.03.2024

Поступила после рецензирования 29.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

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 – measurement of shape defects, laser triangulators, development of professional competencies.

Received 24.03.2024

Revised 29.03.2024

Accepted 04.04.2024

Научная статья

УДК 004.9, 504.064.3, 504.064.4

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-53-60

Эколого-технологическое нормирование как эффективный инструмент обеспечения качества функционирования системы водоотведения производства

Наталья Александровна Жильникова¹

n.zhilnikova@guap.ru, orcid.org/0000-0003-1291-7150, SPIN-код: 3325-4589

Илья Александрович Шишкин¹

_ilya@mail.ru, SPIN-код: 7628-5712

Анна Андреевна Березина¹

✉ anybaranova299751@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-2676-4212, SPIN-код: 9739-3560

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

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения качества очистки сточных вод и механизмы их решения. Определена необходимость гармонизации экологического и технологического нормирования с целью достижения предприятиями-водопользователями заданных экологических стандартов и технологических показателей. Разработан новый метод установления связей между экологическими и технологическими нормативами с применением банка геоданных территориальной водно-ресурсной системы. Предложенный метод включает в себя концептуальную матрицу модели устойчивого функционирования территориальной водно-ресурсной системы, на основе которой разработаны три уровня нормативов в зависимости от степени развития производства, и информационно-программный комплекс для реализации модели эколого-технологического нормирования для отдельных производств, позволяющий повысить эффективность управления территориальными водно-ресурсными системами, а также конкурентоспособность предприятий за счет выявления и обоснования взаимовлияния технологических нормативов и нормативов качества окружающей среды.

Ключевые слова: нормативно допустимый сброс, технологические нормативы, эколого-технологическое нормирование, информационное обеспечение, система водоотведения, норматив допустимого воздействия, наилучшая доступная технология

Для цитирования: Жильникова Н. А., Шишкин И. А., Березина А. А. Эколого-технологическое нормирование как эффективный инструмент обеспечения качества функционирования системы водоотведения производства // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 53–60. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-53-60.

Original article

Environmental and technological regulating as an effective tool for ensuring the quality of operation of the production water disposal system

Natalya A. Zhilnikova¹

nataliazhilnikova@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1291-7150, SPIN-code: 3325-4589

Ilya A. Shishkin¹

_ilya@mail.ru, SPIN-code: 7628-5712

Anna A. Berezina¹

✉ anybaranova299751@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-2676-4212, SPIN-code: 9739-3560

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

Abstract. The article discusses issues of ensuring the quality of wastewater treatment and mechanisms for solving them. The need for harmonization of environmental and technological regulation has been identified in order for water user enterprises to achieve specified environmental standards and technological indicators. A new method has been developed for establishing connections between environmental and technological standards using a geodata bank of the territorial water resource system. The proposed method includes a conceptual matrix of a model for the sustainable functioning of territorial water resource systems, on the basis of which three levels of standards have been developed depending on the degree of development of production, and an information and software complex for implementing a model of environmental and technological standardization for individual industries, which makes it possible to increase the efficiency of territorial water management -resource systems, as well as the competitiveness of enterprises, by identifying and justifying the mutual influence of technological standards and environmental quality standards.

Keywords: normatively permissible discharge, technological standards, environmental and technological regulation, information support, drainage system, permissible impact standard, best available technology

For citation: Zhilnikova N. A., Shishkin I. A., Berezina A. A. Environmental and technological regulating as an effective tool for ensuring the quality of operation of the production water disposal system. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):53–60. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-53-60.

Введение

Проблема обеспечения качества очистки сточных вод по нормативам допустимого сброса (НДС), поступающих в водные объекты, может быть решена внедрением наилучших доступных технологий (НДТ) в систему водоотведения производства. В связи с этим необходима гармонизация технологического (на основе параметров НДТ по категориям объектов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду) и экологического (на основе НДС) нормирования с целью минимизации последствий антропогенного воздействия на окружающую среду [1, 2].

Системный анализ всех факторов, определяющих эффективное взаимодействие всех элементов системы «предприятие – водный объект», и комплексный подход с позиции эколого-технологического нормирования сбросов позволяют определять пути максимального быстрого снижения техногенной нагрузки производства на окружающую среду [3]. Разрабатываемые решения должны представлять собой определенный компромисс между желаемым и экономически возможным. Однако, исходя из опыта имеющихся разработок и исследований, можно констатировать, что подавляющее большинство предприятий различных отраслей промышленности имеют потенциал обеспечения региональных нормативов допустимого воздействия на водные объекты (НДВВО) в рамках территориальных водно-ресурсных систем (ТВРС) за счет совершенствования технологии производства и значительного сокращения водопотребления на единицу выпускаемой продукции, а также совершенствования систем и технологий водоотведения.

Методы и инструменты определения нормативов качества окружающей среды

Экологические и технологические нормативы отдельных производств в рамках ТВРС разрабатываются на основе большого массива данных, для сбора, анализа и систематизации которых требуется информационное обеспечение, соответствующее объективным требованиям, с целью сокращения временных и трудовых затрат. Для разработки проектов НДС и региональных НДВВО, в первую очередь, необходимы систематизация и анализ исходных данных о предприятиях-водопользователях в границах ТВРС. С этой целью на начальном этапе заполняются базы данных

(БД) о загрязняющих веществах, предприятиях, водовыпусках, точках контроля, результатах мониторинга и т. д. в рассматриваемой территориальной водно-ресурсной системе [4, 5], которые создаются с помощью банка данных и системы управления БД (СУБД), реализующими одну из основных задач информационной поддержки. На рис. 1 представлен пример структуры банка данных «СТВОР», который является инструментом для хранения и использования данных на основе программно-аппаратного комплекса. Настоящий банк данных включает в себя несколько БД, справочник БД, СУБД, программное обеспечение в виде геоинформационного моделирующего комплекса. В соответствии с законодательством контроль качества воды в водном объекте осуществляется в контрольном створе – поперечном сечении поверхностного водного объекта, в котором производят отбор проб и проведение измерений в области охраны окружающей среды [6]. Создание и введение данных для разработки НДС должно быть ориентировано на формы дальнейшего использования и виды статистической обработки. Последние включают в себя установление корреляционных зависимостей типа $y = F(x)$ и $y = f(x, z)$, в том числе определение коэффициентов корреляции r и с их помощью оценки тесноты связей; составление уравнений регрессии; оценку стандартного значения критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P = 95\%$. В качестве критериев оценки качества статистических связей и отдельных методов расчета следует применять число членов ряда наблюдений (n); коэффициент корреляции (r); отношение $\left(\frac{ScB}{\sigma_0}\right)$, где

σ_0 – среднее квадратическое отклонение концентрации загрязняющего вещества; ScB – средняя квадратическая ошибка проверочных расчетов концентрации вещества или показателя загрязнения по найденному уравнению регрессии [7].

Для моделирования процессов распространения загрязняющих веществ в водных объектах (ВО) рассматриваемой территориальной (бассейновой) водно-ресурсной системы должна быть выбрана и обоснована модель конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДПиПВ) в зависимости от типизации ВО [1]. Особое внимание при постановке задачи и расчетов следует обратить на виды и степень детализации взаимовлияющих антропогенных воздействий предприятий-водопользователей различных секторов экономи-

туальная матрица модели устойчивого функционирования территориальной водно-ресурсной системы (таблица), на основе которой структурированы и систематизированы термины, относящиеся к экологическому и технологическому нормированию по различным критериям [1, 2]:

– количество загрязняющих веществ и примесей (маркерных веществ), специфичных для отдельного производства;

– номенклатура показателей качества функционирования основного и вспомогательного (система водоотведения) производств на основе НДТ;

- *Концептуальная матрица модели устойчивого функционирования территориальной водно-ресурсной системы*
- *Conceptual matrix of the model of sustainable functioning of the territorial water resource system*

Объект воздействия	Результат воздействия на объект		
	эколого-технологический		эколого-экономический
	водный режим и санитарно-гигиеническое обеспечение	водоохранные мероприятия	
Социально-экономическая среда	Качество воды в водных объектах ТВРС с учетом КДПиПВ		
Научно-техническая среда	Моделирование процесса КДПиПВ. Создание банка геоданных.	Методы и модели мониторинга и прогнозирования качества воды в поверхностных водных объектах, алгоритмы анализа текущей ситуации	Комплексное водоснабжение и водообеспечение населения питьевой водой надлежащего качества по санитарно-гигиеническим показателям.
Лица, принимающие управленческие решения	Координация и управление технологическими процессами производства с применением методов имитационного моделирования с учетом природно-техногенной опасности и экологических рисков	Повышение степени очистки сточных вод, улучшение качества сбрасываемых стоков и качества воды в ВО	Повышение эколого-экономической эффективности водопользования за счет оптимизации водоохранных мероприятий по экологическим, технологическим и экономическим аспектам
Водные ресурсы	Изменение гидрохимического, гидробиологического и санитарно-химического баланса водной геоэкологии и ее аккумулирующей емкости	Обеспечение устойчивости экосистемы поверхностного ВО, сохранение механизмов саморегуляции ВО	Оценка водных ресурсов по экологическим, технологическим и экономическим аспектам
Информация	Банк данных о гидрохимическом, гидробиологическом и санитарно-химическом режимах ВО на основе результатов мониторинга и данных систематических наблюдений за ВО, а также результатов численных экспериментов	Базы данных о НДТ, о техногенном воздействии производств на водные объекты ТВРС	Базы данных по экологическим, экономическим и социальным аспектам водопользования
Модель	Детерминированные, стохастические и динамические модели, уравнения математической физики, математические модели распределения водных ресурсов	Нормативы (НДС и НДВВО), установленные на основе геоинформационного моделирования	Модели экономического управления водными ресурсами
Время	Неустановившийся процесс КДПиПВ с учетом характерного масштаба времени	Реальные или смоделированные геоданные о качестве воды в ВО	Инновационные эколого-технологические и экономические решения
Управление	Распределение водных ресурсов: установление лимитов и квот для субъектов водопользования в ТВРС	Управление водоохранными мероприятиями с минимальным числом альтернативных решений и максимальным количеством учитываемых показателей	Эколого-технологическая оптимизация и повышение эколого-экономической водоохранных мероприятий

- Окончание таблицы
- End of the table

Объект воздействия	Результат воздействия на объект		
	эколого-технологический		эколого-экономический
	водный режим и санитарно-гигиеническое обеспечение	водоохранные мероприятия	
Система водоотведения (вспомогательное производство): регулируемая	Изменение массы вещества в сточных водах за счет увеличения или уменьшения степени очистки и режима сброса при внедрении НДТ.	Влияние типа, характеристик и особенностей режима водоотведения на обеспечение экологических и технологических нормативов.	Обоснование оптимальных капиталовложений в систему водоотведения производства.
нерегулируемая	Заданная степень очистки	Стационарный режим водоотведения	Амортизация капитальных затрат
Водно-ресурсная система	Процесс взаимодействия системы «предприятие – водный объект» в рамках территориальной водно-ресурсной системы	Влияние параметров стоков и водного объекта на режим водоотведения	Оптимальные капиталовложения в водоохранные мероприятия для достижения экологических и технологических нормативов

– интегральные показатели контроля и мониторинга качества воды в сбрасываемых сточных водах и в водном объекте;

– лимиты и квоты водопотребления и водоотведения для отдельных субъектов водопользования, суммарная величина которых соответствует общей антропогенной нагрузке на водные объекты в территориальной водно-ресурсной системе.

Установленные взаимосвязи между экологическими и технологическими нормативами позволили выделить следующие уровни эколого-технологического нормирования в зависимости от степени технологического развития и экологичности производства [2]:

– существующий уровень, который соответствует удельному количеству загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты, на единицу вырабатываемой продукции при фактическом состоянии производства:

$$\text{при } R_i > \text{НДТ}, R_i = \sum M_{ci} q_{\text{ст}},$$

где R_i – технологический показатель производственного процесса; M_{ci} – удельное значение массы сброса i -го маркерного вещества на единицу производимой продукции, $\text{м}^3/\text{год}$; $q_{\text{ст}}$ – расход сточной воды, $\text{м}^3/\text{год}$; НДТ – технологический показатель, определяемый по информационно-технологическому справочнику НДТ;

– возможный уровень, который соответствует удельному количеству загрязняющих веществ,

поступающих в водные объекты, на единицу вырабатываемой продукции при улучшении качества работы оборудования путем модернизации производства. Определяется оценкой технического уровня оборудования на соответствие экологическим стандартам:

$$\text{при } R_i = \text{НДТ}, R_i = \sum M_{ci} q_{\text{ст}}, \text{ или } R_i = \sum C_{\text{max}i},$$

где $C_{\text{max}i}$ – наибольшее допустимое значение концентрации i -го маркерного вещества, $\text{г}/\text{м}^3$;

– перспективный целевой уровень, который соответствует удельному количеству загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты, на единицу вырабатываемой продукции. Определяется оценкой технического уровня оборудования на соответствие наилучшей доступной технологии:

$$\text{при } R_i < \text{НДТ}, R_i = M_{ci} Q_{\text{п}},$$

где $Q_{\text{п}}$ – годовой выпуск продукции, $\text{т}/\text{год}$; M_{ci} – удельное значение массы сброса i -го маркерного вещества на единицу производимой продукции, $\text{т}/\text{год}$.

Метод установления взаимосвязей между экологическими и технологическими нормативами и их гармонизации позволяет обосновывать экологические критерии и технологические показатели наилучших доступных технологий, как для основных, так и для вспомогательных (очист-

ные сооружения) производств, на предприятиях различных отраслей промышленности с целью улучшения качества функционирования производственных систем, включая системы водопотребления и водоотведения.

Информационно-программный комплекс для реализации модели эколого-технологического нормирования на геоинформационной основе

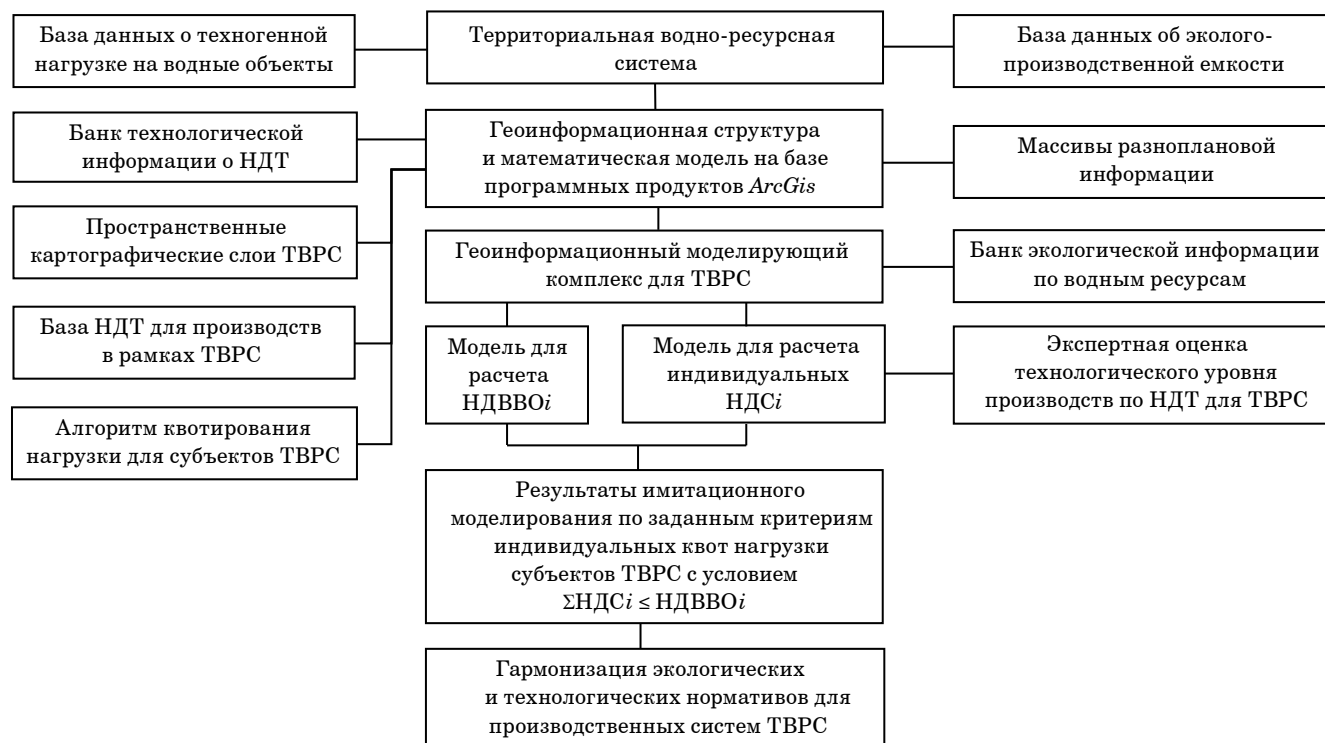
В соответствии с предложенной концептуальной матрицей (таблица), модель эколого-технологического нормирования основывается на нормативах качества окружающей среды (экологических стандартах) и показателях отраслевых НДТ, на базе которых определяется квота допустимой техногенной нагрузки и антропогенного воздействия на поверхностные водные объекты для отдельного субъекта водопользования в рамках ТВРС с учетом взаимовлияния других производств-водопользователей в рассматриваемой ТВРС. Создание интегрированных баз данных, включающих в себя огромные информационные массивы, позволяет реализовывать модель эколого-технологического нормирования с целью устойчивого функциони-

рования ТВРС в краткосрочный и долгосрочный периоды. На рис. 2 показан информационно-программный комплекс реализации модели эколого-технологического нормирования в границах территориальной водно-ресурсной системы.

Предложенный информационно-программный комплекс для реализации модели эколого-технологического нормирования позволяет повысить эффективность управления территориальными водно-ресурсными системами, а также конкурентоспособность производств, входящих в данные системы, за счет выявления и обоснования взаимовлияния технологических нормативов и нормативов качества окружающей среды.

Заключение

Предложенный метод установления взаимосвязей между экологическими и технологическими нормативами и их гармонизации позволяет учесть потребности в ресурсах и интересы в области водопользования всех субъектов хозяйственной деятельности в границах территориальной водно-ресурсной системы в соответствии с требованиями современного природоохранного законодательства, действующих нормативно-правовых



• Рис. 2. Информационно-программный комплекс для реализации модели эколого-технологического нормирования отдельных производств в рамках ТВРС

• Fig. 2. Information and software complex for implementing a model of environmental and technological regulation of individual industries within the framework of territorial water resource systems

актов и стандартов, обеспечить экологический баланс и устойчивость водных геозкосистем при минимизации негативных последствий от воздействий антропогенных источников, а также устой-

чивое экологически безопасное развитие производственных систем как на уровне основного, так и на уровне вспомогательных производств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жильникова Н. А. Методология и инструментарий обеспечения экологичности радиоэлектронных и приборостроительных производств: дис. д-ра техн. наук. СПб.: ГУАП, 2020, 409 с.
2. Жильникова Н. А., Шишкин И. А. Гармонизация технологических и экологических нормативов для радиоэлектронных производственных систем с применением геоинформационных технологий // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 7. С. 77–81.
3. Киприянова Е. Н., Крупина Н. Н. Концептуальные аспекты категорирования промышленных предприятий по уровню аэротехногенной опасности // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 6. С. 76–84. Doi: 10.31799/2949-0693-2023-6-76-84.
4. Шишкин А. И., Антонов И. В., Епифанов А. В. Геоинформационная моделирующая система нормирования допустимых сбросов для целлюлозно-бумажных комплексов // Водное хозяйство России. 2011. № 1. С. 66–80.
5. Алексеев В. В., Куракина Н. И., Орлова Н. В. Геоинформационная система мониторинга водных объектов и нормирования экологической нагрузки // ArcReview. 2006. № 1. С. 9.
6. Система расчета нормативов допустимого воздействия на водные объекты в среде ГИС / А. В. Епифанов [и др.] // ArcReview. 2009. № 4. С. 10–11.
7. Дружинин Н. И., Шишкин А. И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 390 с.

REFERENCES

1. Zhilnikova N. A. Methodology and tools for ensuring the environmental friendliness of radio-electronic and instrument-making industries: dis. Dr. Tech. Sci. SPb.: SUAI; 2020. 409 p. (In Russ.)
2. Zhilnikova N. A., Shishkin I. A. Harmonization of technological and environmental standards for radio-electronic production systems using geoinformation technologies. Issues of radio electronics. 2019;(7):77–81. (In Russ.)
3. Kipriyanova E. N., Krupina N. N. Conceptual aspects of categorizing industrial enterprises according to the level of aerotechnogenic hazard. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(6):76–84. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2023-6-76-84.
4. Shishkin A. I., Antonov I. V., Epifanov A. V. Geoinformation modeling system for normalizing permissible discharges for pulp and paper complexes. Water management of Russia. 2011;(1):66–80. (In Russ.)
5. Alekseev V. V., Kurakina N. I., Orlova N. V. Geographic information system for monitoring water bodies and regulating environmental load. ArcReview. 2006;(1):9. (In Russ.)
6. Epifanov A. V., Shishkin A. I., Antonov I. V., Alekseev V. V., Kurakina N. I., Zheltov E. V. System for calculating standards for permissible impact on water bodies in a GIS environment. ArcReview. 2009;(4):10–11. (In Russ.)
7. Druzhinin N. I., Shishkin A. I. Mathematical modeling and forecasting of land surface water pollution. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989. 390 p. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Жильникова Наталья Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – эколого-экономическая оценка безопасности в природно-технических системах, методология внедрения интегрированных систем менеджмента.

Zhilnikova Natalya A., D. Sc. in Technical Sciences, Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – ecological and economic assessment of safety in natural and technical systems, methodology for the implementation of integrated management systems.

Шишкин Илья Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – геоинформатика, управление природно-техническими комплексами, геоэкология в области обращения с отходами.

Березина Анна Андреевна, аспирант, ассистент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методики и модели управления сложными водно-ресурсными системами.

Поступила в редакцию 21.03.2024

Поступила после рецензирования 25.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

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

Research interests – geoinformatic, management of natural and technical complexes, geoecology in the field of waste management.

Berezina Anna A., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods and models for managing complex water resource systems.

Received 21.03.2024

Revised 25.03.2024

Accepted 04.04.2024

Подход к формированию сил Кориолиса для поступательного и углового перемещения материального объекта в инерциальном пространстве

Игорь Яковлевич Огурцов¹

stfvpkoriolis@gmail.co, orcid.org/0009-0000-5677-1849, SPIN-код: 8610-9492

Дмитрий Анатольевич Первухин²

pervuchin@rambler.ru, orcid.org/0000-0003-3547-2932, SPIN-код: 4499-2113

Ольга Владимировна Афанасьева³

✉ ovaf72@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3169-4781, SPIN-код: 1251-1423

¹ Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В основе формирования сил Кориолиса лежит элементарное устройство для целенаправленного создания на несущем теле движущегося материального объекта указанной силы как результата взаимодействия несущего тела и материального тела (материальной точки), перемещаемого относительно несущего тела как поступательно, так и вращательно. Такое относительное перемещение достигается конструкцией из наружной и внутренней вращающихся в несущем теле рамок и прямолинейной направляющей в составе внутренней рамки. Материальная точка приобретает линейную скорость вдоль прямолинейной направляющей и угловую скорость вместе с прямолинейной направляющей. Таким образом, в составе абсолютного линейного ускорения материальной точки выделяются управляемое ускорение Кориолиса и его «полезная» составляющая, обусловленная относительной угловой скоростью вращения относительно вектора линейной скорости.

Внутренняя сила Кориолиса приводит в движение несущее тело сообразно относительному движению материальной точки – вдоль текущего положения перпендикуляра к прямолинейной направляющей и согласно движению материальной точки в ограниченной по длине прямолинейной направляющей. В общем случае траектория движения будет криволинейной, а движение несущего тела по ней – ограниченным.

Для спрямления траектории перемещения полюса несущего тела элементарные устройства объединяются в пару: оба идентичны друг другу, но одно в начальном положении повернуто относительно другого на 180°.

С целью обеспечения неограниченного поступательного перемещения обозначенного материального объекта в любой момент управляемого создания на борту вектора «полезного» ускорения Кориолиса выполняется обнуление линейной скорости несущего тела, что приводит к начальной скорости несущего объекта только за счет «полезной» силы Кориолиса.

Для осуществления указанного движения предлагается использование настраиваемого многофункционального средства с обеспечением его энергоснабжения бортовым источником.

Приводится аналитическое доказательство осуществления указанного перемещения несущего тела на основе ньютоновской модели пространства и времени, причем совокупность математических выражений является основой для разработки алгоритма и программы управления.

Ключевые слова: материальная точка, материальный объект, несущее тело, инерциальное пространство, инерциальная навигация, ускорение Кориолиса, сила Кориолиса, акселерометр, гироскопический интегратор линейных ускорений

Для цитирования: Огурцов И. Я., Первухин Д. А., Афанасьева О. В. Подход к формированию сил Кориолиса для поступательного и углового перемещения материального объекта в инерциальном пространстве // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 61–71. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-61-71.

Original article

Approach to the Coriolis forces formation for translational and angular displacement of a material object in inertial space

Igor Ya. Ogurtsov¹

stfvpkoriolis@gmail.com, orcid.org/0009-0000-5677-1849, SPIN-code: 8610-9492

Dmitry A. Pervukhin²

pervuchin@rambler.ru, orcid.org/0000-0003-3547-2932, SPIN-code: 4499-2113

Olga V. Afanaseva³

✉ ovaf72@guap.ru, orcid.org/0000-0003-3169-4781, SPIN-code: 1251-1423

¹ Military Institute (Railway troops and military communications) of the Military Logistics Academy, St. Petersburg, Russian Federation² Mikhaylovskaya Artillery Academy, St. Petersburg, Russian Federation³ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The formation of Coriolis forces is based on an elementary device for the purposeful creation of a specified force on the supporting body of a moving material object as a result of the interaction of the supporting body and the material body (material point), which is moved relative to the supporting body both translationally and rotationally. This relative displacement is achieved by a structure consisting of an outer and inner frame rotating in the supporting body and a rectilinear guide consisting of an internal one scope. A material point acquires a linear velocity along a rectilinear guide and an angular velocity along with a rectilinear guide. Thus, in the composition of the absolute linear acceleration of a material point, the controlled Coriolis acceleration and its "useful" component are distinguished due to the relative angular velocity of rotation of the relative linear velocity vector.

The internal Coriolis force sets the supporting body in motion according to the relative motion of the material point: along the current position of the perpendicular to the rectilinear guide and according to the motion of the material point, in a rectilinear guide limited in length. In general, the trajectory of motion will be curvilinear, and the movement of the supporting body along it will be limited.

To straighten the trajectory of the pole movement of the supporting body, elementary devices are combined into pairs: both are identical to each other, but one is rotated relative to the other by 180 degrees in the initial position.

In order to ensure unlimited translational displacement of the designated material object at any moment of the controlled creation of the "useful" Coriolis acceleration vector on board, the linear velocity of the supporting body is zeroed, which leads to the initial velocity of the supporting object only due to the "useful" Coriolis force.

To carry out this movement, it is assumed to use a customizable multifunctional vehicle with its power supply by an on-board source.

An analytical proof of the implementation of the specified displacement of the supporting body on the basis of the Newtonian model of space and time is given, and a set of mathematical expressions is the basis for the development of an algorithm and a control program.

Keywords: material point, material object, supporting body, inertial space, inertial navigation, Coriolis acceleration, Coriolis force, accelerometer, gyroscopic integrator of linear accelerations

For citation: Ogurtsov I. Ya., Pervukhin D. A., Afanaseva O. V. Approach to the Coriolis forces formation for translational and angular displacement of a material object in inertial space. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):61–71. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-61-71.

Введение

Перемещение материального объекта в инерциальном пространстве сопряжено с выбором направления перемещения и силового импульса для движения вдоль выбранного направления. Материальный объект свободен в инерциальном пространстве, если в этом пространстве нет другого материального тела, которое своей массой воздействовало бы на материальный объект, например, массой реактивной струи.

Материальный объект как минимум включает в свой состав несущее материальное тело и внутреннее материальное тело, так или иначе связанное с несущим телом. Например, материальный предмет может просто лежать внутри несущего тела, но так, что все его относительные перемещения ограничены оболочкой несущего тела.

Движение свободного материального объекта можно осуществить перемещением внутри материального объекта материального тела, которое через связь с несущим телом материального объекта осуществит внутреннее силовое воздействие на несущее тело. Вследствие ограниченного перемещения материального тела внутри материального объекта перемещение свободного материального объекта в инерциальном пространстве

также ограничено, причем перемещения центров масс несущего тела и внутреннего материального тела будут происходить вдоль текущего положения прямой, проходящей через неподвижный в инерциальном пространстве центр массы материального объекта. При этом не надо забывать, что для броска материального предмета в оболочку несущего тела надо точно такой же импульс приложить к несущему телу, но в противоположном направлении.

Ради краткости изложения сказанное не сопровождается ссылками на положения теоретической механики, в частности, на известные законы Ньютона.

Широко известен и реально осязаем закон Карла Максимовича Бэра (1857) о подмыве берегов рек, текущих вдоль меридианов Земли, когда создается внутренняя реальная сила воздействия массы потока воды на материальное несущее тело Землю как планету [1, 2].

Примерно в те же годы трудился французский механик член Парижской Академии наук (1836) Гюстав Гаспар Кориолис (Coriolis) [3]. В своих трудах Г. Г. Кориолис сформулировал положения теории относительного движения, введя понятия о силе и ускорении Кориолиса.

При постановке задачи об управляемом поступательном движении материальных объектов

в космическом пространстве почти сразу появилась мысль об использовании силы Кориолиса; мысль основывалась и на том, что в космосе (и не только в космосе) для угловой стабилизации несущих тел посредством гироскопов используется гироскопический эффект Кориолиса [4].

Управление движением космического аппарата называют инерциальной навигацией, управляющим комплексом служит инерциальная навигационная система (ИНС) с центральным прибором – инерциальным навигационным устройством (ИНУ) [5]. В основе ИНС лежит воспринимающий элемент в виде материального тела, здесь моделируемого материальной точкой. Воспринимающие материальные точки в виде специальных устройств – акселерометров или гироскопических интеграторов линейных ускорений (ГИЛУ) – располагаются на несущем теле в виде гиросtabilизированной платформы. Измеряются силы инерции воспринимающих элементов, дважды по определенному алгоритму интегрируются, в результате чего вычисляется местоположение движущегося аппарата. Курс аппарата определяется вычислениями на основе системы координат, реализуемой той же гиросtabilизированной платформой, на которой устанавливается телескоп астрокоррекции курса [6].

В дополнение к мысли об использовании силы Кориолиса как управляющей силы для перемещения несущего тела в инерциальном пространстве появилось следствие: теперь материальное тело внутри несущего тела становится не воспринимающим, а управляющим элементом соответствующей ИНС.

Оставалось представить конструкцию и ее электромеханическое обеспечение для размещения управляющей материальной точки и управляемого движения материальной точки относительно несущего тела.

Конструкция следовала из общеизвестной формулы ускорения Кориолиса, а ее осуществление следовало из устройства ГИЛУ. ГИЛУ по классической немецкой схеме содержит массивный вращающийся ротор, подвешенный «на плече» во внутренней рамке, которая поворачивается относительно наружной рамки; наружная рамка установлена в несущем теле, так, что ротор вместе с рамками неограниченно вращается вокруг оси наружной рамки относительно несущего тела [7–12].

Под действием силы инерции ротора его ось стремится отклониться от перпендикуляра к оси наружной рамки, но удерживается в ортогональном положении электромеханической системой межрамочной коррекции [11].

Для размещения вместо воспринимающего элемента – ротора – управляющего элемента – материальной точки в виде шарика с исчезающе малым радиусом – ротор по его оси заменяется на прямолинейную направляющую в виде трубки с шариком внутри.

Устройство называется «массоход». Массоход как исходное элементарное устройство включает в свой состав:

- материальное тело (воспринимающий элемент ИНС), моделируемое материальной точкой, для простоты записей именуемое «шариком»;

- прямолинейную направляющую ограниченной длины с обозначением срединной начальной точки, вдоль которой свободно перемещается шарик;

- внутреннюю рамку в виде упомянутой прямолинейной направляющей с шариком, которая имеет ось вращения, проходящую через срединную начальную точку перпендикулярно оси прямолинейной направляющей;

- наружную рамку, относительно которой без ограничения вращается внутренняя рамка с прямолинейной направляющей и шариком, причем ось наружной рамки перпендикулярна оси внутренней рамки, закреплена подшипниками в несущем теле, и вокруг нее без ограничения вращается наружная рамка вместе с внутренней рамкой и прямолинейной направляющей с шариком.

Материальная точка в массоходе приобретает линейную скорость вдоль прямолинейной направляющей и угловую скорость вместе с прямолинейной направляющей. Таким образом, в составе абсолютного линейного ускорения материальной точки выделяются управляемое ускорение Кориолиса и его «полезная» составляющая, обусловленная относительной угловой скоростью вращения относительного вектора линейной скорости [9].

Рассмотрим принципы создания управляемой силы Кориолиса.

Несущее материальное тело

Твердое тело любой формы, любой массы, с любым распределением массы под замкнутой или незамкнутой поверхностью тела. Характеристики несущего тела:

M^{HT} – масса несущего тела;

C^{HT} – центр массы несущего тела;

O^{HT} – полюс несущего тела. Как правило, полюс несущего тела располагается в его центре массы;

$\vec{i}^{\text{HT}} \vec{j}^{\text{HT}} \vec{k}^{\text{HT}}$ – правый ортонормированный базис, связанный с несущим телом;

$O_{\text{HT}} \vec{T}^{\text{HT}}$ – тензор инерции несущего тела в его полюсе и в связанном с несущим телом базисе.

В частности, для несущего тела в форме сферы с равномерным распределением массы по сфере тензор инерции выражается формулой:

$$O_{\text{HT}} \vec{T}_I^{\text{HT}} = \begin{vmatrix} I^{\text{HT}} & 0 & 0 \\ 0 & I^{\text{HT}} & 0 \\ 0 & 0 & I^{\text{HT}} \end{vmatrix};$$

I^{HT} – постоянный момент инерции;

$\vec{R}_{O_{\text{HT}}}^{\text{HT}}$ – радиус-вектор полюса несущего тела относительно инерциальной точки И, неподвижной в инерциальном пространстве;

$\vec{\rho}_i, i = 1, 2, 3, \dots, N$, где обозначено для несомых тел одного типа N – число несомых материальных тел на несущем теле;

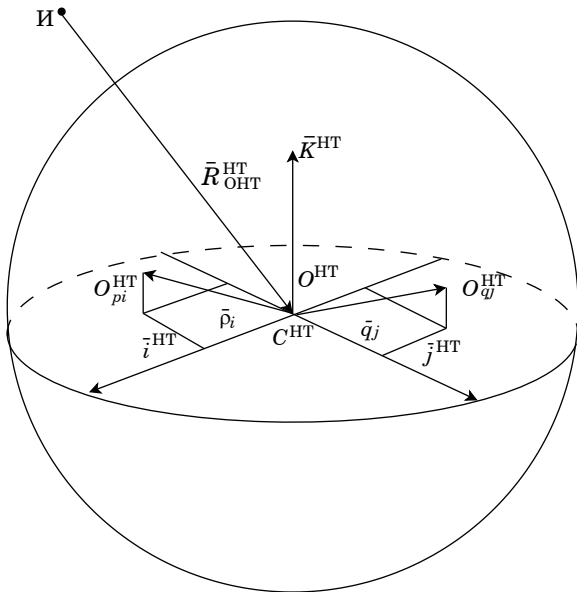
$\vec{q}_j, j = 1, 2, 3, \dots, K$, где обозначено для несомых тел одного другого типа K – число несомых материальных тел на несущем теле;

$\vec{\rho}_i, \vec{q}_j$ – постоянные радиусы-векторы относительно полюса несущего тела точек (полюсов) расположения в несущем теле центров несомых тел;

O_{pi}^{HT} – полюсы несомых тел одного типа на несущем теле;

O_{qj}^{HT} – полюсы несомых тел другого типа на несущем теле.

Первый тип устройств на несущем теле – массоходы с управляющими материальными точка-



• Рис. 1. Схема несущего тела в инерциальном пространстве
 • Fig. 1. Diagram of a supporting body in inertial space

ми; второй тип устройств на несущем теле – гироскопы.

Указанные величины и их обозначения поясняются на рис. 1 [9, 10, 13–15].

Массоход

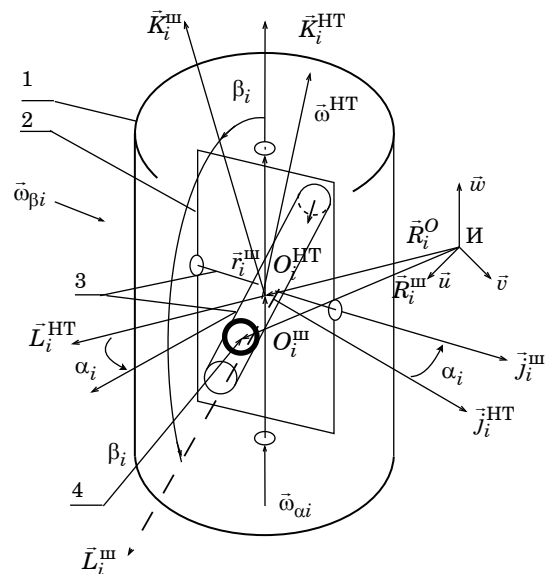
Название несомого материального тела объясняется, с одной стороны, требованием краткости в обозначении, а с другой – сутью действия устройства – перемещением (ходом) несущего тела в инерциальном пространстве за счет управляющей массы.

Схема массохода иллюстрируется на рис. 2. Рисунок изображает кинематическую схему элементарного устройства создания силы Кориолиса на отдельном материальном теле в виде шарика как материальной точки.

Несущее твердое материальное тело (на рис. 2 в виде цилиндра) имеет ось с направлением единичного вектора \vec{k}_i^{HT} . Вдоль этой оси располагаются следующие элементы: наружная рамка, внутренняя рамка с прямолинейной направляющей, материальное тело в виде шарика.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – основание массохода – несущее тело; 2 – наружная рамка; 3 – внутренняя рамка с прямолинейной направляющей; 4 – материальное тело в виде шарика.

Системы координат и радиусы-векторы: И – произвольная точка инерциального пространства, неподвижная; $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$ – правый ортонормированный базис инерциальной системы координат,



• Рис. 2. Схема массохода
 • Fig. 2. Mass-driver diagram

неподвижный; i – индекс массохода $i = 1, 2, 3, \dots, N$; N – число массоходов на несущем теле; \vec{R}_i^O – радиус-вектор точки O_i^{HT} несущего тела как полюса массохода в инерциальном пространстве; \vec{R}_i^u – радиус-вектор в инерциальном пространстве центра массы материального тела в виде шарика; \vec{r}_i^{III} – относительный радиус-вектор центра массы материального тела в виде шарика; $\vec{i}_i^{\text{HT}}, \vec{j}_i^{\text{HT}}, \vec{k}_i^{\text{HT}}$ – правый ортонормированный базис, связанный с несущим телом в точке O_i^{HT} расположения центра массохода; $\vec{i}_i^{\text{III}}, \vec{j}_i^{\text{III}}, \vec{k}_i^{\text{III}}$ – правый ортонормированный базис прямолинейной направляющей.

Углы и угловые скорости вращений: $\alpha_i, \beta_i; \vec{\omega}_{\alpha i}, \vec{\omega}_{\beta i}$ – углы и векторы угловых скоростей вращений, соответственно, наружной рамки относительно несущего тела и внутренней рамок относительно наружной; $\vec{\omega}^{\text{HT}}$ – абсолютная угловая скорость несущего тела.

Инерционные характеристики материальных тел массохода:

– наружная рамка: M_i^{HP} $i = 1, 2, 3, \dots, N$ – масса наружной рамки i -го массохода; $\text{ОНТ}_i \vec{T}_i^{\text{HP}}$ – тензор инерции наружной рамки в центре O_i^{HT} и в базе наружной рамки $\vec{i}_i^{\text{HP}}, \vec{j}_i^{\text{HP}}, \vec{k}_i^{\text{HT}}$ для i -го массохода;

– внутренняя рамка с прямолинейной направляющей: M_i^{BP} $i = 1, 2, 3, \dots, N$ – масса внутренней рамки i -го массохода; $\text{ОНТ}_i \vec{T}_i^{\text{BP}}$ – тензор инерции внутренней рамки в центре O_i^{HT} и в базе внутренней рамки $\vec{i}_i^{\text{III}}, \vec{j}_i^{\text{III}}, \vec{k}_i^{\text{III}}$ для i -го массохода.

Материальное тело в виде шарика

Введем следующие обозначения для материального тела в виде шарика:

M_i^{III} $i = 1, 2, 3, \dots, N$ – масса материального тела i -го массохода;

$\text{ОНТ}_i \vec{T}_i^{\text{III}}$ – тензор инерции материального тела в центре O_i^{III} и в базе материального тела $\vec{i}_i^{\text{III}}, \vec{j}_i^{\text{III}}, \vec{k}_i^{\text{III}}$ для i -го массохода.

Для однородного материального шарика тензор инерции записывается в виде:

$$\text{ОНТ}_i \vec{T}_i^{\text{III}} = \begin{vmatrix} I^{\text{III}} & 0 & 0 \\ 0 & I^{\text{III}} & 0 \\ 0 & 0 & I^{\text{III}} \end{vmatrix}$$

– тензор инерции материального тела в виде однородного шарика в центре O_i^{III} и в базе шарика $\vec{i}_i^{\text{III}}, \vec{j}_i^{\text{III}}, \vec{k}_i^{\text{III}}$, равно как и в базе внутренней рамки $\vec{i}_i^{\text{III}}, \vec{j}_i^{\text{III}}, \vec{k}_i^{\text{III}}$; I^{III} – постоянный момент инерции.

Тогда массоход работает следующим образом:

1) материальное тело в виде шарика при перемещении вдоль прямолинейной направляющей

приобретает линейную скорость относительно несущего тела;

2) прямолинейная направляющая за счет вращений рамок приобретает относительную угловую скорость в несущем теле;

3) относительные поступательные перемещения и вращения материального тела (шарика) приводят к возникновению сначала силы Кориолиса, а затем к соответствующему движению несущего тела в инерциальном пространстве [9, 10, 16, 17].

Ускорение Кориолиса определяется известным выражением $2\vec{\omega}_e \times \vec{v}_r$, где $\vec{\omega}_e$ – переносная угловая скорость вращения материального тела вместе с прямолинейной направляющей; \vec{v}_r – относительная линейная скорость перемещения материального тела в несущем теле вдоль прямолинейной направляющей.

Вектор ускорения Кориолиса направлен по перпендикуляру к вектору относительной линейной скорости.

Переносная угловая скорость представляет собой сумму вектора угловой скорости в относительном движении материального тела и вектора угловой скорости несущего тела;

4) относительные движения материальных элементов массохода (прежде всего, материального тела – шарика) и переносные движения несущего материального тела уравниваются внутри свободной материальной системы, но именно за счет вынужденных движений несущего тела в инерциальном пространстве;

5) в процессе уравнивания несущее тело и совершает управляемое движение в инерциальном пространстве, и эти движения являются предметом научного исследования.

Очевидно, что движения несущего тела ограничиваются относительными перемещениями материального тела в ограниченном пространстве несущего тела. Это существенное ограничение на использование массохода как движителя. Однако на первой стадии проводимого научного исследования изучаются именно движения несущего тела в инерциальном пространстве за счет сил Кориолиса. Предполагается, что возможны варианты использования массохода для неограниченных поступательных перемещений несущего тела.

Ускорения и силы инерции материальных точек массоходов как движущие силы материального объекта в инерциальном пространстве

Записывается выражение радиуса-вектора центра массы материальных точек всех массоходов в несущем теле согласно рис. 1; 2 по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_C^{\text{III}} &= \frac{1}{M_C^{\text{III}}} \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} (\bar{\rho}_i + \bar{r}_i^{\text{III}}); \\ M_C^{\text{III}} &= \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}}; \quad \bar{\rho}_i + \bar{r}_i^{\text{III}} = \bar{\rho}_i^{\text{III}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где выделяется радиус-вектор центра всех центров массоходов на несущем теле:

$$\bar{\rho}_{C0}^{\text{III}} = \frac{1}{M_C^{\text{III}}} \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \bar{\rho}_i, \quad (2)$$

который при симметричном расположении массоходов на несущем теле относительно полюса несущего тела тождественно равен нулевому вектору:

$$\bar{\rho}_{C0}^{\text{III}} = \frac{1}{M_C^{\text{III}}} \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \bar{\rho}_i \equiv \bar{0}. \quad (3)$$

Для симметрично располагаемых на несущем теле массоходов радиус-вектор центра массы всех их материальных точек в несущем теле определяется выражением:

$$\bar{r}_C^{\text{III}} = \frac{1}{M_C^{\text{III}}} \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \bar{r}_i^{\text{III}}, \quad (4)$$

где N – четное натуральное число.

В выражении (4) под знаком суммы располагаются радиусы-векторы материальных точек всех массоходов по отдельности. Каждая материальная точка в некий начальный момент времени начинает двигаться принудительно относительно несущего тела, а затем и относительно, и вместе с несущим телом. Особенность в том, что материальная точка в массоходе всегда перемещается поступательно «вперед – назад» вдоль прямолинейной направляющей, которая сначала в некий начальный момент времени вращается вместе с внутренней рамкой относительно наружной рамки, затем вместе с наружной рамкой относительно несущего тела и, наконец, вместе с несущим телом вращается в инерциальном пространстве.

В действительности прямолинейная направляющая может «сколь-нибудь заметно» и не вращаться в инерциальном пространстве, однако, «заметно» вращаясь относительно несущего тела, а несущее тело, в свою очередь, «заметно» вращается в инерциальном пространстве, причем в противоположную сторону относительно вращению прямолинейной направляющей.

Сказанное аналитически описывается процессом абсолютного дифференцирования радиуса-вектора материальной точки с использовани-

ем известной теоремы теоретической механики «об относительной производной». Теорема кратко описывается выражением:

$$\frac{d}{dt} \bar{a} = \frac{d_r}{dt} \bar{a} + \bar{\Omega} \times \bar{a},$$

где $\frac{d}{dt}, \frac{d_r}{dt}$ – соответственно абсолютная и относительная производные; \bar{a} – дифференцируемый вектор, вращающийся в абсолютном пространстве с угловой скоростью $\bar{\Omega}$.

Дважды абсолютно дифференцируется инерциальный радиус-вектор материальной точки массохода, второе слагаемое которого всегда лежит вдоль прямолинейной направляющей и вместе с ней вращается в инерциальном пространстве (рис. 2):

$$\bar{R}_i^{\text{III}} = \bar{R}_i^0 + \bar{r}_i^{\text{III}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad (5)$$

первое абсолютное дифференцирование:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \bar{R}_i^{\text{III}} &= \frac{d}{dt} \bar{R}_i^0 + \frac{d}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} = \\ &= \frac{d}{dt} \bar{R}_i^0 + \frac{d_r}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} + (\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \bar{r}_i^{\text{III}}; \end{aligned} \quad (6)$$

второе абсолютное дифференцирование:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \bar{r}_i^{\text{III}} &= \frac{d^2}{dt^2} \bar{R}_i^0 + \frac{d_r^2}{dt^2} \bar{r}_i^{\text{III}} + (\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \\ &\times \frac{d_r}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} + \frac{d}{dt} (\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \bar{r}_i^{\text{III}} + \\ &+ (\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \\ &\times \left[\frac{d_r}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} + (\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \bar{r}_i^{\text{III}} \right] = \end{aligned}$$

или после относительно несложных преобразований:

$$\begin{aligned} &= \frac{d^2}{dt^2} \bar{R}_i^0 + \frac{d_r^2}{dt^2} \bar{r}_i^{\text{III}} + \\ &+ \left[\frac{d_r}{dt} \bar{\omega}^{\text{HT}} + \frac{d_r}{dt} \bar{\omega}_{\alpha i} + \frac{d_r}{dt} \bar{\omega}_{\beta i} \right] \times \bar{r}_i^{\text{III}} + \\ &+ \bar{\omega}^{\text{HT}} \times (\bar{\omega}^{\text{HT}} \times \bar{r}_i^{\text{III}}) + \bar{\omega}_{\alpha i} \times (\bar{\omega}_{\alpha i} \times \bar{r}_i^{\text{III}}) + \\ &+ \bar{\omega}_{\beta i} \times (\bar{\omega}_{\beta i} \times \bar{r}_i^{\text{III}}) + 2\{(\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \frac{d_r}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} + \\ &+ \bar{\omega}^{\text{HT}} \times [(\bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \bar{r}_i^{\text{III}}] + \bar{\omega}_{\alpha i} \times (\bar{\omega}_{\beta i} \times \bar{r}_i^{\text{III}})\}. \end{aligned} \quad (7)$$

В результате двух абсолютных (в инерциальном пространстве) дифференцирований записывается результат:

– абсолютная (инерциальная) линейная скорость материальной точки отдельного массохода (6):

$$\frac{d}{dt} \bar{R}_i^{\text{III}} = \frac{d}{dt} \bar{R}_i^0 + \frac{d_r}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} + (\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \bar{r}_i^{\text{III}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N;$$

– абсолютное (инерциальное) линейное ускорение материальной точки отдельного массохода (7):

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \bar{R}_i^{\text{III}} &= \frac{d^2}{dt^2} \bar{R}_i^0 + && \text{первая строка} \\ &+ \frac{d_r^2}{dt^2} \bar{r}_i^{\text{III}} + && \text{вторая строка} \\ &+ \left[\frac{d_r}{dt} \bar{\omega}^{\text{HT}} + \frac{d_r}{dt} \bar{\omega}_{\alpha i} + \frac{d_r}{dt} \bar{\omega}_{\beta i} \right] \times \bar{r}_i^{\text{III}} + && \text{третья строка} \\ &+ \bar{\omega}^{\text{HT}} \times (\bar{\omega}^{\text{HT}} \times \bar{r}_i^{\text{III}}) + \bar{\omega}_{\alpha i} \times (\bar{\omega}_{\alpha i} \times \bar{r}_i^{\text{III}}) + \bar{\omega}_{\beta i} \times (\bar{\omega}_{\beta i} \times \bar{r}_i^{\text{III}}) + && \text{четвертая строка} \\ &+ 2(\bar{\omega}^{\text{HT}} + \bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \frac{d_r}{dt} \bar{r}_i^{\text{III}} + && \text{пятая строка} \\ &+ \bar{\omega}^{\text{HT}} \times [(\bar{\omega}_{\alpha i} + \bar{\omega}_{\beta i}) \times \bar{r}_i^{\text{III}}] + && \text{шестая строка} \\ &+ \bar{\omega}_{\alpha i} \times (\bar{\omega}_{\beta i} \times \bar{r}_i^{\text{III}}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. && \text{седьмая строка} \end{aligned}$$

Из выражения абсолютного ускорения (7) материальной точки массохода следует искомая конкретная структура этого ускорения, которая описывается по строкам выражения (7):

– *первая строка* – составляющая ускорения за счет движения несущего тела в инерциальном пространстве;

– *вторая строка* – составляющая ускорения за счет ускорения управляемого относительного перемещения материальной точки в ее прямолинейной направляющей;

– *третья строка* – составляющая ускорения за счет ускорений при угловых вращениях прямолинейной направляющей как при относительном, так и при переносном движениях;

– *четвертая строка* – три составляющие осестремительных ускорений, всегда направленные перпендикулярно направлениям соответствующих векторов угловых скоростей;

– *пятая, шестая и седьмая строки* – все с «кориолисовым множителем 2» три составляющие ускорения Кориолиса материальной точки массохода.

Составляющие ускорения Кориолиса описываются следующим образом:

– в *пятой строке* – можно сказать, «обычное» и широко известное ускорение Кориолиса как следствие линейной скорости перемещения материальной точки по прямолинейной направляющей и вращения прямолинейной направляющей в инерциальном пространстве. Составляющая в пятой строке обуславливает эффект перемещения Кориолиса;

– в *шестой строке* – составляющая ускорения Кориолиса, в которой относительная линейная скорость материальной точки задается вращением относительного радиуса-вектора за счет вращений обеих рамок относительно несущего тела, а угловой скоростью вращения прямолинейной направляющей служит угловая скорость несущего тела. Составляющая в шестой строке обуславливает гироскопический эффект Кориолиса, а именно – переносный;

– в *седьмой строке* – составляющая ускорения Кориолиса, в которой относительная линейная скорость материальной точки задается вращением радиуса-вектора за счет вращения одной внутренней рамки относительно несущего тела, а в качестве угловой скорости вращения прямолинейной направляющей выступает угловая скорость вращения наружной рамки относительно несущего тела. Составляющая в седьмой строке обуславливает гироскопический эффект Кориолиса, а именно – относительный.

При желании исключить наружную рамку из конструкции массохода надо иметь в виду, что будет исключена управляемая составляющая, влияющая на образование несущим телом задаваемого инерциального направления и устойчивого вращения несущего тела вокруг инерциального направления, т. е. исключен относительный гироскопический эффект Кориолиса.

Обратим внимание на отличия в направлениях векторов осестремительных ускорений, с одной стороны, и ускорений Кориолиса – с другой стороны: если осестремительное ускорение направляется от материальной точки обязательно по перпендикуляру к вектору угловой скорости вращения прямолинейной направляющей, то ускорение Кориолиса направляется от материальной точки либо по перпендикуляру

к прямолинейной направляющей (пятая строка), либо необязательно по перпендикуляру к вектору угловой скорости вращения прямолинейной направляющей (шестая и седьмая строки). Отсюда следует различное воздействие на движение материального объекта осестремительных ускорений (центробежные силы инерции) и ускорений Кориолиса (силы Кориолиса).

После двукратного абсолютного дифференцирования выражения (4), с учетом выражений (6) и (7), получим следующее:

– формула «относительной» линейной скорости центра массы всех материальных точек массоходов, симметрично расположенных относительно полюса несущего тела:

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_C^{\text{III}} = \frac{1}{M_C^{\text{III}}} \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \frac{d}{dt} \vec{r}_i^{\text{III}}, \quad (8)$$

где

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_i^{\text{III}} = \frac{d_r}{dt} \vec{r}_i^{\text{III}} + (\vec{\omega}^{\text{HT}} + \vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \vec{r}_i^{\text{III}};$$

– формула «относительного» линейного ускорения центра массы всех материальных точек массоходов, симметрично расположенных относительно полюса несущего тела

$$\frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_C^{\text{III}} = \frac{1}{M_C^{\text{III}}} \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_i^{\text{III}}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_i^{\text{III}} = & \frac{d_r^2}{dt^2} \vec{r}_i^{\text{III}} + \left[\frac{d_r}{dt} \vec{\omega}^{\text{HT}} + \frac{d_r}{dt} \vec{\omega}_{\alpha i} + \frac{d_r}{dt} \vec{\omega}_{\beta i} \right] \times \vec{r}_i^{\text{III}} + \\ & + \vec{\omega}^{\text{HT}} \times (\vec{\omega}^{\text{HT}} \times \vec{r}_i^{\text{III}}) + \vec{\omega}_{\alpha i} \times (\vec{\omega}_{\alpha i} \times \vec{r}_i^{\text{III}}) + \vec{\omega}_{\beta i} \times (\vec{\omega}_{\beta i} \times \vec{r}_i^{\text{III}}) + \\ & + 2\{(\vec{\omega}^{\text{HT}} + \vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \frac{d_r}{dt} \vec{r}_i^{\text{III}} + \\ & + \vec{\omega}^{\text{HT}} \times [(\vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \vec{r}_i^{\text{III}}] + \vec{\omega}_{\alpha i} \times (\vec{\omega}_{\beta i} \times \vec{r}_i^{\text{III}})\}. \end{aligned}$$

В формулах (8) и (9) термин «относительный» помещен в кавычки по следующим причинам:

– в обозначениях к формулам содержится переносная угловая скорость несущего тела;

– ради сокращения записей в формулах специально не выделяются слагаемые, обусловленные переносным движением несущего тела.

Для всех материальных точек массоходов, в силу «обратного» движения несущего тела, в их центре массы возникает «относительная» сила инерции как вектор, приложенный к центру массы материальных точек; согласно формуле (9), которая определяется выражением:

$$-M_C^{\text{III}} \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_C^{\text{III}} = -\sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_i^{\text{III}}. \quad (10)$$

Из выражения (9) получаем силу Кориолиса:

$$\begin{aligned} \vec{K} = & -\sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} 2\{(\vec{\omega}^{\text{HT}} + \vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \frac{d_r}{dt} \vec{r}_i^{\text{III}} + \\ & + \vec{\omega}^{\text{HT}} \times [(\vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \vec{r}_i^{\text{III}}] + \vec{\omega}_{\alpha i} \times (\vec{\omega}_{\beta i} \times \vec{r}_i^{\text{III}})\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Особо отметим, что без движений материальных управляющих точек массоходов относительно несущего тела сила Кориолиса (11) тождественно равна нулевому вектору.

Естественно, что сила Кориолиса приводит к моменту сил Кориолиса относительно полюса несущего тела:

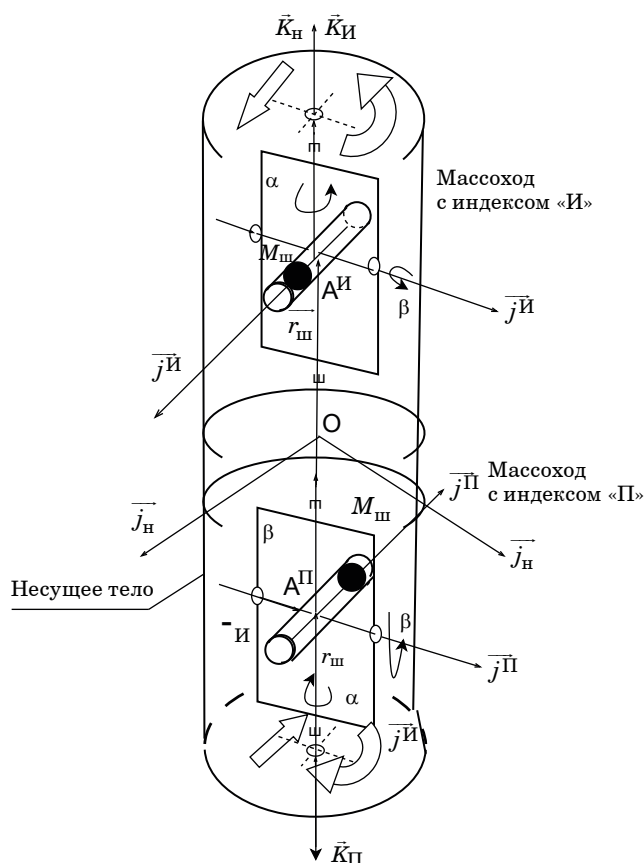
$$\begin{aligned} \text{ОНТ } \vec{M}_K \equiv \vec{r}_C^{\text{III}} \times \vec{K} = & -2 \sum_{i=1}^N M_i^{\text{III}} \vec{r}_i^{\text{III}} \times \\ & \times \{(\vec{\omega}^{\text{HT}} + \vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \frac{d_r}{dt} \vec{r}_i^{\text{III}} + \\ & + \vec{\omega}^{\text{HT}} \times [(\vec{\omega}_{\alpha i} + \vec{\omega}_{\beta i}) \times \vec{r}_i^{\text{III}}] + \vec{\omega}_{\alpha i} \times (\vec{\omega}_{\beta i} \times \vec{r}_i^{\text{III}})\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где базис основания исходного массохода $\vec{i}_H \vec{j}_H \vec{k}_H$; $M_{\text{III}}, r_{\text{III}}$ – материальное тело в виде шарика, относительный радиус-вектор шарика.

Через конструктивные связи управляющих элементов всех массоходов в виде материальных точек с несущим телом сила Кориолиса (11) и момент силы Кориолиса (12) приведут к движению несущего тела в инерциальном пространстве: от момента силы несущее тело будет управляемо поворачиваться, от силы будет управляемо перемещаться поступательно; и это движение может быть прекращено в любой момент времени полной остановкой относительных движений массоходов.

Согласно формуле силы Кориолиса (11), можно предполагать, что для одного массохода на несущем теле поступательное перемещение несущего тела в инерциальном пространстве будет происходить по перпендикуляру к текущему положению прямолинейной направляющей, т. е. траектория будет искривляться в инерциальном пространстве согласно вращению прямолинейной направляющей. Надо помнить, что без вращения прямолинейной направляющей не будет силы Кориолиса.

Для спрямления траектории на несущее тело устанавливаются два массохода симметрично относительно полюса несущего тела. Массоходы спариваются конструктивно и электромеханически. Кинематические схемы спарки массоходов иллюстрируются на рис. 3 (спаривание «вдоль»); 4 (спаривание «поперек»).



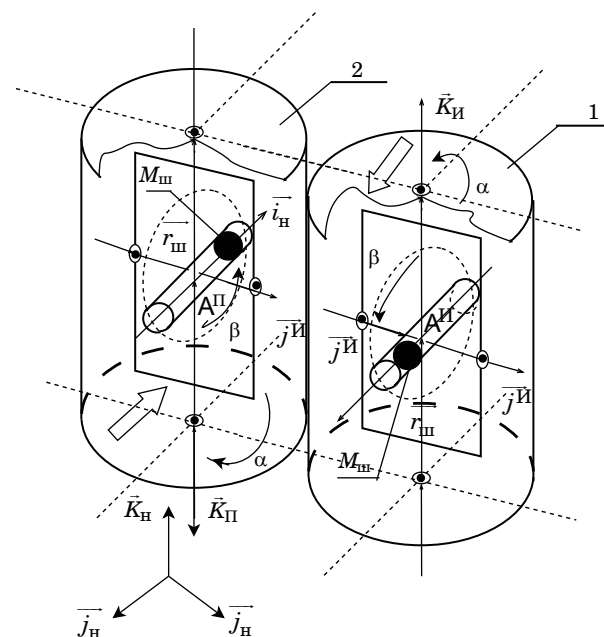
• Рис. 3. Спаренные массоходы, спаривание «вдоль»
 • Fig. 3. Paired mass-drivers, pairing “along”

Конструктивность спаривания в том, что для начального положения исходного массохода с индексом «И» другой массоход с индексом «П» получается из исходного поворотом на 180° вокруг оси внутренней рамки.

Электромеханичность спаривания в том, что массоходы, управляемые по отдельности, могут двигаться одинаково синхронно, причем такое движение может восприниматься как встречно симметричное движение массоходов.

На рис. 4 1 – исходный массоход с материальным телом в виде шарика и относительным радиусом-вектором соответственно, M_{III}, r_{III} ; базис основания исходного массохода i_H, j_H, k_H ; 2 – присоединенный повернутый массоход.

Симметричное синхронное установившееся встречно симметричное движение спаренных массоходов приведет к построению инерциального направления, фиксированного и в несущем теле, и в инерциальном пространстве, вокруг которого несущее тело будет вращаться в колебательном режиме, совершая возвратно-поступательные перемещения вдоль фиксированного инерциального направления. Амплитуда продольных колебаний по инерциальному направ-



• Рис. 4. Спаренные массоходы, спаривание «поперек»
 • Fig. 4. Paired mass-drivers, “crosswise” pairing

лению ограничена в силу ограниченности длин прямолинейных направляющих и пропорциональна отношению масс всех материальных точек и массы несущего тела [4, 18].

Поступательные перемещения несущего тела – проявление эффекта перемещения Кориолиса; фиксация инерциального направления – проявление гироскопического эффекта Кориолиса.

Заключение

Действия силы Кориолиса и момента Кориолиса осуществляются совместно с прочими силами и моментами сил инерции на управляющих материальных точках материального объекта, например, с центробежными силами инерции и соответствующими моментами центробежных сил инерции. Можно надеяться, что для массоходов главной основной силой инерции будет сила Кориолиса.

Каким будет конкретное движение несущего тела в инерциальном пространстве при задействовании массоходов, можно выяснить двумя способами:

1) аналитически, путем составления дифференциальных уравнений движения материального объекта и их решения в виде конечных уравнений движения в общем виде;

2) экспериментальными испытаниями действующего макета устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 4: Брасос – Веш. М.: Сов. энцикл., 1971. С. 193–194.
2. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 9: Евклид – Ибсен. М.: Сов. энцикл., 1972. С. 476–494, 477–478, 510–511.
3. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 13: Конда – Кун. М.: Сов. энцикл., 1973. С. 128; 178.
4. Огурцов И. Я., Потапенко А. А. Гироскопический эффект Кориолиса // Восьмые Окуневские чтения: Междунар. конф. (СПб., 25–28 июня 2013 г.). СПб., 2013. С. 238–241.
5. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 17: Моршин – Никиш. М.: Сов. энцикл., 1974. С. 191–192.
6. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 10: Ива – Италики. М.: Сов. энцикл., 1972. С. 270–272.
7. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 6: Газлифт – Гоголево. М.: Сов. энцикл., 1971. С. 60–62; 554–562.
8. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 11: Италия – Кваркуш. М.: Сов. энцикл., 1973. С. 411–412.
9. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. 1: Статика и кинематика. М.: Гостехиздат, 1955. С. 53; 154; 162–164; 324; 336; 341–344; 354.
10. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики: Т. 2: Динамика. М.: Гостехиздат, 1955. С. 19; 309; 322; 324; 344–353; 404; 413; 422–424; 551; 554–564; 564–569; 569–574.
11. Николаи Е. Л., Климов Д. М. Гироскоп в кардановом подвесе / с предисл. А. Ю. Ишлинского и с доп. Д. М. Климова. 2-е изд. М.: Наука, 1964. С. 1–22.
12. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз; 1961. С. 79; 82; 415.
13. Аппель П. Э. Теоретическая механика: в 2 т. / пер. с 5-го фр. изд. И. Г. Малкина. Т. 2: Динамика системы. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1960. С. 259.
14. Хаар Д. тер. Основы гамильтоновой механики / пер. с англ. В. А. Угарова. М.: Наука, 1974. С. 9; 43 45; 115–116; 116–118.
15. Лич Дж. У. Классическая механика / пер. с англ. Я. И. Секерж-Зеньковича; под. ред. Л. Н. Сретенского. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. С. 9–11; 37–38; 44–48.
16. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 18: Никко – Отолиты. М.: Сов. энцикл., 1974. С. 164–168.
17. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 28: Франкфурт – Чага. М.: Сов. энцикл., 1978. С. 122–123.
18. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / пер. с англ. И. Г. Арамановича [и др.]; под общ. ред. И. Г. Арамановича. 2-е изд. М.: Наука, 1970. С. 253.

REFERENCES

1. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 4. Moscow: Soviet encyclopedia; 1971, pp. 193–194. (In Russ.).
2. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia; in 30 vol. Vol. 9. Moscow: Soviet encyclopedia; 1972, pp. 476–494; 477–478; 510–511. (In Russ.).
3. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 13. Moscow: Soviet encyclopedia; 1973, pp. 128; 178. (In Russ.).
4. Ogurtsov I. Yu., Potapenko A. A. Gyroscopic Coriolis effect. The Eighth Okunev's readings: International conference (25–28 June 2013, SPb., Russia). SPb.; 2013, pp. 238–41. (In Russ.).
5. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 17. Moscow: Soviet encyclopedia; 1974, pp. 191–192. (In Russ.).
6. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 10. Moscow: Soviet encyclopedia; 1972, pp. 270–272. (In Russ.).
7. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 6. Moscow: Soviet encyclopedia; 1971, pp. 60–62; 554–562. (In Russ.).
8. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 11. Moscow: Soviet encyclopedia; 1972, pp. 411–412. (In Russ.).

9. Loitsyanskii L. G., Lure A. I. Theoretical mechanics course. Vol. 1. Moscow: Gostexizdat; 1955, pp. 53; 154; 162–164; 324; 336; 341–344; 354. (In Russ.).
10. Loitsyanskii L. G., Lure A. I. Theoretical mechanics course. Vol. 2. Moscow: Gostexizdat; 1955, pp. 19; 309; 322; 324; 344–353; 404; 413; 422–424; 551; 554–564; 564–569; 569–574. (In Russ.).
11. Nikolai E. L., Klimov D. M. Gyroscope in gimbal suspension. Moscow: Nauka; 1964, pp. 1–22. (In Russ.).
12. Lure A. I. Analytical mechanics. Moscow: Fizmatgiz; 1961, pp. 79; 82; 415. (In Russ.).
13. Appell P. E. Theoretical mechanics. Vol. 2. Moscow: Fizmatgiz; 1960; pp. 259. (In Russ.).
14. Haar D. ter. Elements of hamiltonian mechanics. Moscow: Nauka; 1974, pp. 9; 43–45; 115–118. (In Russ.).
15. Leech J. W. Classical mechanics. Moscow: Foreign Languages Publishing House; 1961, pp. 9–11; 37–38; 44–48. (In Russ.).
16. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 18. Moscow: Soviet encyclopedia; 1974, pp. 164–168. (In Russ.).
17. Prokhorov A. M. Great soviet encyclopedia: in 30 vol. Vol. 28. Moscow: Soviet encyclopedia; 1978, pp. 122–123. (In Russ.).
18. Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook for scientists and engineers. Moscow: Nauka; 1970, pp. 253. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Огурцов Игорь Яковлевич, кандидат технических наук, доцент Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения.

Область научных интересов – теоретическая механика, математическое моделирование многомассовых систем, гироскопических устройств.

Первухин Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Михайловской военной артиллерийской академии.

Область научных интересов – теоретическая механика и моделирование сложных технических систем.

Афанасьева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – диагностика и контроль состояния сложных технических объектов.

Ogurtsov Igor Y., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Military Institute (Railway troops and military communications) of the Military Logistics Academy.

Research interests – theoretical mechanics, mathematical modeling of multi-mass systems, gyroscopic devices.

Pervukhin Dmitry A., D. Sc. in Technical Sciences, Full Professor, Senior Researcher, 3rd Scientific Research Institute, Scientific Research Center, Mikhaylovskaya Artillery Academy.

Research interests – theoretical mechanics and modeling of complex technical systems.

Afanaseva Olga V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – diagnostics and control of the condition of complex technical objects.

Поступила в редакцию 05.02.2024

Поступила после рецензирования 19.02.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Received 05.02.2024

Revised 19.02.2024

Accepted 04.04.2024

Научная статья
УДК 612.822.3, 57.087.1

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-72-77

Построение границы области возникновения двухпериодических колебаний в нелинейной модели сенсорного нейрона

Ольга Евгеньевна Дик¹

dick@infran.ru, orcid.org/0000-0001-5056-1779, SPIN-код: 5302-5278

Елена Александровна Фролова¹

frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879, SPIN-код: 9285-1102

Алексей Сергеевич Акилин¹

✉ it.wonder@mail.ru, orcid.org/0009-0005-3770-9480

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

Аннотация. С помощью бифуркационного анализа решена задача определения условий возникновения сложных двухпериодических колебаний в виде режима пачечной активности в нелинейной модели сенсорного нейрона спинальных ганглиев крыс и построения границы этой области при изменении параметров модели. Актуальность предложенного подхода состоит в необходимости выявления влияния различных параметров анализируемой модели на изменение режимов импульсной активности сенсорных нейронов, связанное с возможными физическими или химическими воздействиями.

Ключевые слова: бифуркационный анализ, двухпериодичность, быстрая и медленная подсистемы

Для цитирования: Дик О. Е., Фролова Е. А., Акилин А. С. Построение границы области возникновения двухпериодических колебаний в нелинейной модели сенсорного нейрона // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 72–77. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-72-77.

Original article

Constructuon of the boundary of the two-period oscillation region in the nonlinear model of sensory neuron

Olga E. Dick¹

dick@infran.ru, orcid.org/0000-0001-5056-1779, SPIN-code: 5302-5278

Elena A. Frolova¹

frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879, SPIN-code: 9285-1102

Alexey S. Akilin¹

✉ e-mail: it.wonder@mail.ru, orcid.org/0009-0005-3770-9480

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

Abstract. Using bifurcation analysis, we solved the problem of determining the conditions for the occurrence of complex two-period oscillations in the form of a burst activity mode in a nonlinear model of a sensory neuron in the rat spinal ganglia and constructing the boundary of this region when changing the model parameters. The relevance of the proposed approach lies in the need to identify the influence of various parameters of the analyzed model on changes in the modes of impulse activity of sensory neurons associated with possible physical or chemical influences.

Keywords: bifurcation analysis, two-periodicity, fast and slow subsystems

For citation: Dick O. E., Frolova E. A., Akilin A. S. Constructuon of the boundary of the two-period oscillation region in the nonlinear model of sensory neuron. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):72–77. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-72-77.

Введение

Нелинейные модели нейронов проявляют чрезвычайно разнообразные режимы поведения [1–3]. Эти режимы зависят от разнообразного числа уравнений, входящих в эти модели, и от значений параметров моделей. При изменении значений некоторых параметров возможно возникновение

различных типов решений, например, стационарных состояний или периодических решений, при которых наблюдаются ритмические импульсы, а также появление сложных двухпериодических колебаний в виде пачечных разрядов, в которых наблюдаются переходы между активной фазой, связанной с высокочастотными ритмическими импульсами, и фазой их отсутствия, во время

которой существуют низкочастотные колебания [2–5]. Причины появления таких сложных двухпериодических колебаний могут быть связаны с модуляцией быстрых импульсов с медленной потенциал-зависимой обратной связью или с кальций-зависимой обратной связью, т. е. в некоторых нейронах быстрые колебания мембранного потенциала могут модулироваться кальций-зависимыми клеточными процессами [3], а в других нейронах они могут зависеть от работы потенциалуправляемых ионных каналов, находящихся в структуре нейрональных мембран [6–8]. Возможность динамических переходов в нелинейных моделях нейронов представляет собой актуальную задачу при изучении механизмов регуляции нейрональной активности при изменениях параметров ионных каналов, связанных с определенным фармакологическим или физическим воздействием [3, 9]. Например, известно, что хроническое сдавливание, гипоксия или воспаление чувствительных к боли сенсорных нейронов (ноцицептивных нейронов) способствуют переходу от ритмической активности в виде медленных разрядов к пачечной активности [9–11]. В этом смысле пачечные разряды в сенсорных нейронах играют важную роль в инициации болевого синдрома. Важнейшим инструментом анализа режимов импульсной активности является метод бифуркационного анализа [12], позволяющий выявлять соотношения между типом нейрональной активности и параметрами нейронов [1, 8, 9].

Целями работы являются применение бифуркационного анализа и поиск условий возникновения пачечной активности в нелинейной модели сенсорного нейрона спинальных ганглиев крыс и построение границы области сложных двухпериодических колебаний в виде режима пачечной активности при изменении параметров модели.

Материал и методы исследования

Нелинейная модель сенсорного нейрона может быть представлена системой дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= F_1(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p), \\ dx_2 / dt &= F_2(x_1, x_2), \\ dx_3 / dt &= F_3(x_1, x_3), \\ dx_4 / dt &= F_4(x_1, x_4), \\ dn / dt &= F_5(x_1, n), \\ dr / dt &= F_6(x_1, r), \end{aligned} \quad (1)$$

где переменная x_1 описывает состояние мембранного потенциала; переменные x_2, x_3, x_4, n, r опре-

деляют активационные и инактивационные воротные структуры потенциал-зависимых каналов мембраны нейрона; p – вектор параметров модели. Данная модель включает в себя три ионных канала, обеспечивающих проведение быстрого и медленного натриевых токов и медленного калиевого тока. Переменные x_2, x_3 соответствуют быстрым процессам активации и инактивации быстрого натриевого тока, переменные x_4, r соответствуют быстрому процессу активации и медленному процессу инактивации медленного натриевого тока, переменная n определяет медленный процесс активации медленного калиевого тока.

Численные решения системы (1) находились с помощью метода Рунге – Кутты четвертого порядка, модифицированного за счет применения алгоритма Гира с выбором переменного шага интегрирования.

В силу того, что режим сложных двухпериодических колебаний в виде пачечной активности связан с взаимодействием быстрых и медленных колебаний мембранного потенциала, для нахождения границы области сложных двухпериодических колебаний мы применили разложение исходной системы на две подсистемы – медленную и быструю.

Поскольку n и r являются медленными переменными системы, в качестве быстрой подсистемы будем рассматривать систему

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= F_1(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p), \\ dx_2 / dt &= F_2(x_1, x_2), \\ dx_3 / dt &= F_3(x_1, x_3), \\ dx_4 / dt &= F_4(x_1, x_4), \end{aligned} \quad (2)$$

в которой переменные n и r являются медленно изменяющимися бифуркационными параметрами.

Медленную систему запишем в виде:

$$\begin{aligned} F_1(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &= 0, \\ dn / dt &= F_5(x_1, n), \\ dr / dt &= F_6(x_1, r). \end{aligned} \quad (3)$$

При таком разложении исходной системы (1) возникновение быстрой компоненты пачечного разряда рассматривается как результат бифуркации быстрой подсистемы при изменении значений медленных переменных n и r , которые играют роль бифуркационных параметров [1].

Матрица Якоби медленной подсистемы имеет вид:

$$J(n, r, x_{1st}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_5(x_{1st})}{\partial n} & \frac{\partial F_5(x_{1st})}{\partial r} \\ \frac{\partial F_6(x_{1st})}{\partial n} & \frac{\partial F_6(x_{1st})}{\partial r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение линеаризованной медленной подсистемы в стационарной точке может быть записано в виде:

$$\det(J - \lambda I) = \lambda^2 + a_1\lambda + a_2\lambda = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= -(a + d), \\ a_2 &= ad - bc. \end{aligned}$$

Бифуркация Андронова – Хопфа, связанная с рождением предельного цикла, в медленной подсистеме возникает в случае, если корни характеристического уравнения при определенных значениях параметров системы становятся чисто мнимыми $\lambda_1 = -i\omega, \lambda_2 = i\omega$ [12]. В этом случае соотношения между собственными числами матрицы Якоби и коэффициентами характеристического уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0, \\ a_2 &= \omega^2 > 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, система уравнений для получения значений медленных переменных n и r , связанных с условиями бифуркации Андронова – Хопфа, может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} T(x_1, n, r) &= 0, \\ V(x_1, n, r) &> 0, \\ F_1(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Матрица Якоби быстрой подсистемы имеет вид:

$$J(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1}{\partial x_3} & \frac{\partial F_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2}{\partial x_3} & \frac{\partial F_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_1} & \frac{\partial F_3}{\partial x_2} & \frac{\partial F_3}{\partial x_3} & \frac{\partial F_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x_1} & \frac{\partial F_4}{\partial x_2} & \frac{\partial F_4}{\partial x_3} & \frac{\partial F_4}{\partial x_4} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Характеристическое уравнение линеаризованной системы в стационарной точке может быть записано в виде:

$$\det(J - \lambda I) = \lambda^4 + a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d = 0. \quad (9)$$

Условием бифуркации Андронова – Хопфа рождения предельного цикла для быстрой подсистемы является нахождение параметров, при которых два комплексно-сопряженных соб-

ственных числа матрицы Якоби становятся чисто мнимыми $\lambda_1 = -i\omega, \lambda_2 = i\omega$, а остальные собственные числа вещественны и отрицательны $\lambda_3 < 0, \lambda_4 < 0$ [12]. В этом случае соотношения между собственными числами матрицы Якоби и коэффициентами характеристического уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} a &= -\lambda_3 - \lambda_4, \\ b &= \lambda_3\lambda_4 + \omega^2, \\ c &= -\omega^2(\lambda_3 + \lambda_4), \\ d &= \omega^2\lambda_3\lambda_4, \end{aligned} \quad (10)$$

откуда следуют соотношения:

$$\begin{aligned} a^2d - abc + c^2 &= 0, \\ a > 0, b > 0, c > 0, d > 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая, что коэффициенты характеристического уравнения являются функциями, которые зависят от параметров p, n, r и фазовых переменных x_1, x_2, x_3, x_4 , запишем левые части уравнения и неравенства в виде:

$$\begin{aligned} R(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &= 0, \\ G_i(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &> 0, i = 1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, система уравнений для получения бифуркационных значений параметров p, n, r быстрой подсистемы может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} R(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &= 0, \\ G_i(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &> 0, i = 1, \dots, 4, \\ F_1(x_1, x_2, x_3, x_4, n, r, p) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Нахождение границы области сложных двух-периодических колебаний в виде режима пачечной активности может быть связано с поиском значений параметров, при которых предельный цикл медленной подсистемы на плоскости (n, r) касается кривой бифуркации Андронова – Хопфа для быстрой подсистемы. В связи с этим определение точек границы области сложных двух-периодических колебаний может быть сведено к следующим процедурам:

- 1) нахождение бифуркационной кривой для быстрой подсистемы;
- 2) нахождение предельного цикла медленной подсистемы;
- 3) нахождение значений параметров p_1 и p_2 , при которых предельный цикл медленной подсистемы касается бифуркационной кривой Хопфа для быстрой подсистемы.

Результаты исследования

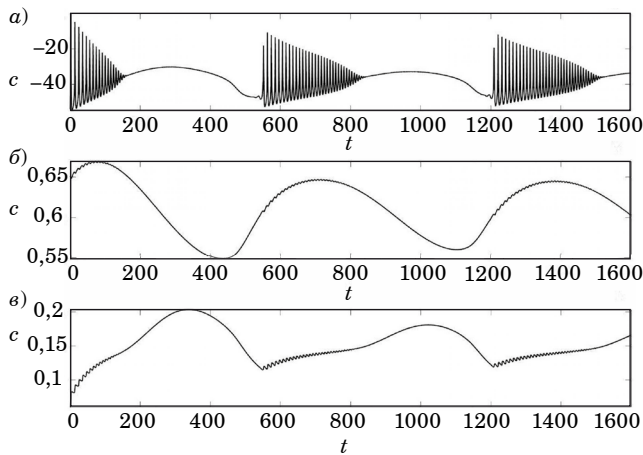
На рис. 1 показаны изменения быстрой фазовой переменной x_1 (рис. 1, а) и медленных фазовых переменных r (рис. 1, б) и n (рис. 1, в), соответствующие пачечным разрядам мембранного потенциала x_1 на фоне медленных колебаний инактивационной переменной медленного натриевого тока и активационной переменной медленного калиевого тока.

На рис. 2 изображены примеры изменения положения предельного цикла медленной подсистемы (сплошная кривая) относительно бифуркационной кривой быстрой подсистемы (штрихпунктирная кривая) при изменении значения бифуркационного параметра p_1 . Отсутствие двухпериодических колебаний соответствует отсутствию точек пересечения предельного цикла и бифурка-

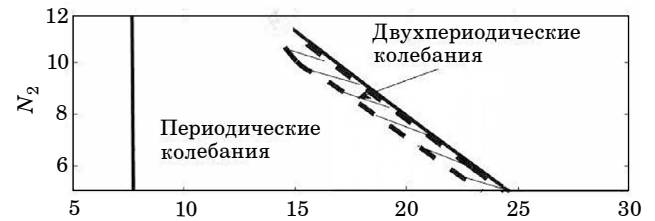
ционной кривой (рис. 2, а), а пересечение кривых соответствует точке, лежащей на границе области двухпериодических колебаний (рис. 2, б).

Пример построенной границы области сложных двухпериодических колебаний на плоскости параметров (p_1, p_2) приведен на рис. 3. Точкам этой границы соответствуют значения параметров, при которых предельный цикл медленной подсистемы на плоскости ее фазовых переменных (r, n) касается кривой бифуркации Андронова – Хопфа для быстрой подсистемы (рис. 2, б). Значениям параметров p_1, p_2 , при которых находятся две точки пересечения предельного цикла медленной подсистемы и кривой бифуркации Андронова – Хопфа для быстрой подсистемы на плоскости (r, n) , соответствуют точки плоскости бифуркационных параметров (p_1, p_2) , лежащие внутри области сложных двухпериодических колебаний.

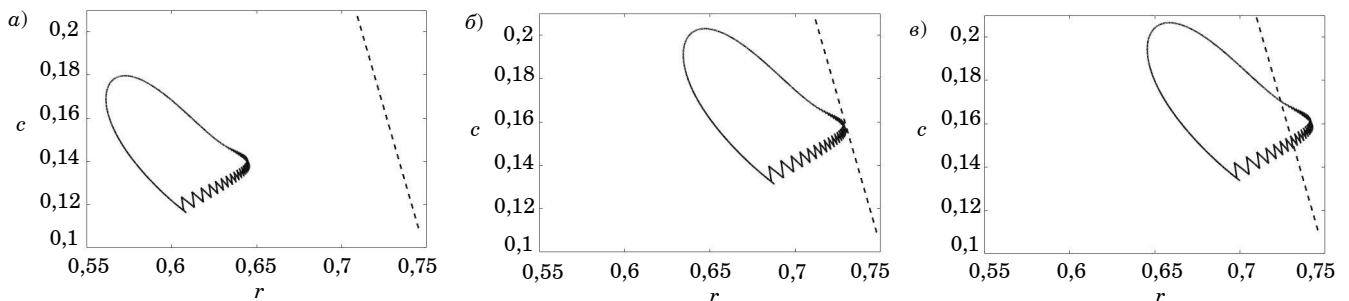
Рассмотренные параметры p_1 и p_2 задают значения плотности потенциал-зависимого медлен-



• Рис. 1. Колебания быстрых и медленных фазовых переменных модели, соответствующие пачечным разрядам мембранного потенциала x_1 (а), и медленных фазовых переменных r (б) и n (в)
 • Fig. 1. Oscillations of fast and slow phase variables of the model, corresponding to burst discharges of membrane potential x_1 (a) and slow phase variables r (б) and n (в)



• Рис. 3. Граница области сложных двухпериодических колебаний на плоскости параметров (p_1, p_2) , построенная на основании нахождения значений параметров, при которых кривая бифуркации Андронова – Хопфа для быстрой подсистемы касается предельного цикла медленной подсистемы на плоскости (r, n) (рис. 2, б)
 • Fig. 3 The boundary of the region of complex two-periodic oscillations on the parameter plane (p_1, p_2) , constructed on the basis of finding the parameter values at which the Andronov – Hopf bifurcation curve for the fast subsystem touches the limit cycle of the slow subsystem on the plane (r, n) (fig. 2, б)



• Рис. 2. Различия в относительном положении предельного цикла медленной подсистемы (сплошная кривая) и бифуркационной кривой быстрой подсистемы (штрихпунктирная кривая) при изменении параметра p_1 . Отсутствие двухпериодических колебаний (а), наличие двухпериодических колебаний (б, в)
 • Fig. 2. Differences in the relative position of the limit cycle of the slow subsystem (solid curve) and the bifurcation curve of the fast subsystem (dash-dotted curve) when the parameter p_1 changes. Absence of two-periodic oscillations (a) and presence of two-periodic oscillations (б, в)

ного натриевого тока и величины внешнего болевого стимула соответственно. Границы области двухпериодических колебаний отмечены штрихпунктирными линиями. Эта область находится внутри области периодических колебаний, границы которой на рис. 3 изображены сплошными линиями.

Заключение

Примененный в работе метод на основании бифуркационного анализа двух подсистем с быстрыми и медленными переменными позволил определить условия возникновения сложных

двухпериодических колебаний в нелинейной модели, описывающей поведение сенсорного нейрона спинальных ганглиев крыс. Кроме того, наш подход предоставил возможность визуализировать значения параметров, при которых происходят качественные изменения решений системы дифференциальных уравнений, задающих нелинейную модель сенсорного нейрона, путем построения двухпараметрической бифуркационной диаграммы с границей области сложных двухпериодических колебаний. Важно отметить, что при построении границы области сложных двухпериодических колебаний популярный пакет MATCONT не использовался в силу того, что он не позволяет построить такую границу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Izhikevich E. M.* Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting. Cambridge: The MIT Press, 2007. 522 p.
2. Bifurcation, bursting and spike frequency adaptation / J. Guckenheimer [et al.] // *J. comp. neurosci.* 1997. № 4. P. 257–277.
3. Bursts as a unit of neural information: selective communication via resonance / E. M. Izhikevich [et al.] // *Trends in neuroscience.* 2003. № 26. P. 161–167.
4. Mixed-mode oscillations with multiple time scales / M. Desroches [et al.] // *Siam review.* 2012. № 54. P. 211–288.
5. Mixed-mode oscillations and bifurcation analysis in a pituitary model / F. Zhan [et al.] // *Nonlinear dynamics.* 2018. № 94. P. 807–826.
6. Дик О. Е. Нелинейная динамика паттернов импульсной активности ноцицептивных нейронов при коррекции повреждающего болевого воздействия // *Журн. техн. физики.* 2019. № 89. С. 465–474.
7. Dick O. E. Mechanisms of dynamical complexity changes in patterns of sensory neurons under antinociceptive effect emergence // *Neurocomputing.* 2020. Vol. 378, № 2. P. 120–128. Doi: 10.1016/j.neucom.2019.10.004.
8. *Izhikevich E. M.* Neural excitability, spiking and bursting // *J. bifur. and chaos.* 2000. № 10. P. 1171–1266.
9. *Devor M.* Ectopic discharge in A-beta afferents as a source of neuropathic pain // *Exp. brain res.* 2009. № 196. P. 115–128.
10. Bursting activity in myelinated sensory neurons plays a key role in pain behavior induced by localized inflammation of the rat sensory ganglion / W. Xie [et al.] // *J. neuroscience.* 2012. № 206. P. 212–223.
11. Chronic spontaneous activity generated in the somata of primary nociceptors is associated with pain-related behavior after spinal cord injury / S. S. Bedi [et al.] // *J. neuroscience.* 2010. № 30. P. 14870–14882.
12. *Seydel R.* Practical bifurcation and stability analysis. Berlin: Springer, 2010. 477 p.

REFERENCES

1. Izhikevich E. M. Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting. Cambridge: The MIT Press; 2007. 522 p.
2. Guckenheimer J., Harris-Warrick R. M., Peck J. et al. Bifurcation, bursting and spike frequency adaptation. *J. comp. neurosci.* 1997;(4):257–277.
3. Izhikevich E. M., Desai N. S., Walcott E. C. et al. Bursts as a unit of neural information: selective communication via resonance. *Trends in neuroscience.* 2003;(26):161–167.
4. Desroches M., Guckenheimer J., Krauskopf B. et al. Mixed-mode oscillations with multiple time scales. *Siam review.* 2012;(54):211–288.
5. Zhan F., Liu S., Zhang X. et al. Mixed-mode oscillations and bifurcation analysis in a pituitary model. *Nonlinear dynamics.* 2018;(94):807–826.
6. Dik O. E. Nonlinear dynamics of firing activity patterns of nociceptive neurons during management of damaging pain stimulation. *Technical physics.* 2019;64(3):427–435. Doi: 10.1134/S1063784219030101.

7. Dick O. E. Mechanisms of dynamical complexity changes in patterns of sensory neurons under antinociceptive effect emergence. *Neurocomputing*. 2020;378(2):120–128. Doi: 10.1016/j.neucom.2019.10.004.
8. Izhikevich E. M. Neural excitability, spiking and bursting, *J. Bifur. and Chaos*. 2000;(10):1171–1266.
9. Devor M. Ectopic discharge in A-beta afferents as a source of neuropathic pain. *Exp. brain res*. 2009;(196):115–128.
10. Xie W., Strong J. A., Kim D. et al. Bursting activity in myelinated sensory neurons plays a key role in pain behavior induced by localized inflammation of the rat sensory ganglion. *J. neuroscience*. 2012;(206): 212–223.
11. Bedi S. S., Yang Q., Crook R. J. et al. Chronic spontaneous activity generated in the somata of primary nociceptors is associated with pain-related behavior after spinal cord injury. *J. neuroscience*. 2010;(30): 14870–14882.
12. Seydel R. *Practical bifurcation and stability analysis*. Berlin: Springer; 2010. 477 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дик Ольга Евгеньевна, доктор биологических, доцент, доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы нелинейной динамики в задачах анализа нелинейных динамических систем.

Фролова Елена Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы управления качеством сложных технических систем.

Акилин Алексей Сергеевич, магистрант кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, нелинейные динамические системы.

Dick Olga E., D. Sc. in Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods of nonlinear dynamics in problems of analysis of nonlinear dynamic systems.

Frolova Elena A., D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods of quality management of complex technical systems.

Akilin Alexey S., Master Student at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – mathematical modeling, methods of nonlinear dynamics.

Поступила в редакцию 12.02.2024

Поступила после рецензирования 19.02.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Received 12.02.2024

Revised 19.02.2024

Accepted 04.04.2024

О нелинейном резонансе поляризованных оптических волн

Александр Олегович Смирнов¹

✉ alsmir@guap.ru, orcid.org/0000-0002-6781-2105, SPIN-код: 7228-3916

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

Аннотация. Выведены интегрируемые двухкомпонентные нелинейные дифференциальные уравнения, имеющие приложения в нелинейной оптике. Получены стационарные уравнения, которым удовлетворяют простейшие нетривиальные решения. Указаны значения параметров стационарных уравнений, при которых в рассмотренной нелинейной модели возникает резонанс, заключающийся в возникновении неограниченно возрастающих решений.

Ключевые слова: нелинейное уравнение Шредингера, уравнение Каупа – Ньюэлла, уравнение Чень – Ли – Лю, уравнение Герджикова – Иванова, векторное 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 нелинейном резонансе поляризованных оптических волн // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 78–85. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-78-85.

Original article

On the nonlinear resonance of polarized optical waves

Aleksandr O. Smirnov¹

✉ alsmir@guap.ru, orcid.org/0000-0002-6781-2105, SPIN-code: 7228-3916

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

Abstract. Integrable two-component nonlinear differential equations with applications in nonlinear optics are derived. Stationary equations are obtained, which are satisfied by the simplest nontrivial solutions. The values of the parameters of stationary equations are indicated, at which a resonance occurs in the considered nonlinear model, consisting in the appearance of infinitely increasing solutions.

Keywords: nonlinear Schrödinger equation, Kaup – Newell equation, Chen – Lee – Liu equation, Gerdjikov – Ivanov equation, vector 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 the nonlinear resonance of polarized optical waves. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(2):78–85. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-2-78-85.

Введение

Хорошо известно (см., например, [1, 2]), что в процессе прохождения сигналов по оптическому волокну происходит взаимодействие электромагнитных волн с материалом оптического волокна, что обуславливает нелинейность волн, распространяющихся в оптических каналах. Когда нелинейность слабая, то волны являются почти линейными, что приводит к искажениям волнового фронта вследствие дисперсии и, следовательно, к необходимости установки компенсаторов и усилителей через не очень большие расстояния. Правильно подобранный материал оптического канала позволяет с помощью более сильной нелинейности компенсировать влияние дисперсии. В таких каналах могут распространяться опти-

ческие сигналы в виде солитонов [1–4], т. е. уединенных криволинейных импульсов, способных проходить достаточно большие расстояния без потери формы. Естественно, затухание сигнала вследствие диссипации остается, но усилители и повторители позволяют восполнить потери энергии. Вместе с тем нелинейность канала вносит искажения, приводящие к большим проблемам при восстановлении информации из полученного сигнала. В настоящее время основное внимание уделяется методам, которые анализируют зависимость искажений сигнала от нелинейных спектральных данных и вносят в сигнал компенсирующие эти искажения добавки [5]. Постоянный рост информационного трафика по оптическим каналам заставляет искать способы увеличить пропускную способность этих каналов. Одним из

этих способов является передача поляризованных сигналов, когда одновременно по каналу передаются двояко-поляризованные волны [6–10]. Это позволяет передавать в два раза больше информации в один и тот же интервал времени.

Интегрируемые нелинейные уравнения, т. е. уравнения, имеющие решения в виде солитонов, как правило, могут быть получены как условие совместности двух линейных дифференциальных уравнений, которые называются парой Лакса. Нелинейным уравнениям, описывающим распространение оптических сигналов, соответствуют матричные линейные дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} \Psi_x &= \mathbf{U}\Psi, \\ \Psi_t &= \mathbf{V}\Psi. \end{aligned} \quad (1)$$

В случае скалярных нелинейных уравнений эти матрицы имеют размер 2×2 и зависят от двух функций p и $q = (\pm p)^*$. Чем больше нелинейных эффектов учитывается в модели, тем сложнее эти матрицы. В частности, можно указать на нелинейное уравнение Шредингера [11–13]:

$$\begin{aligned} ip_t + p_{xx} - 2p^2q &= 0, \\ iq_t - q_{xx} + 2q^2p &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

которое является условием совместности уравнений (1) с матрицами

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \lambda \mathbf{J} - \mathbf{Q}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & ip \\ -iq & 0 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{V} &= 2\lambda \mathbf{U} - \mathbf{V}^0, \quad \mathbf{V}^0 = \begin{pmatrix} ipq & -p_x \\ -q_x & -ipq \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

и производные варианты нелинейного уравнения Шредингера, к которым относятся уравнения Каупа – Ньюэлла [14]:

$$\begin{aligned} ip_t + p_{xx} - i(p^2q)_x &= 0, \\ iq_t - q_{xx} - i(q^2p)_x &= 0; \end{aligned} \quad (3)$$

Чень – Ли – Лью [15]:

$$\begin{aligned} ip_t + p_{xx} - ipqp_x &= 0, \\ iq_t - q_{xx} - ipqq_x &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

и Герджикова – Иванова [16, 17]:

$$\begin{aligned} ip_t + p_{xx} + ip^2q_x + \frac{1}{2}p^3q^2 &= 0, \\ iq_t - q_{xx} + iq^2p_x - \frac{1}{2}p^2q^3 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Пара Лакса для уравнений (4)–(6) имеет вид (1), где

$$\mathbf{U} = (-i\lambda^2 - ispq)\mathbf{J} + \lambda\mathbf{Q}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & p \\ q & 0 \end{pmatrix},$$

матрица \mathbf{V} имеет более сложный вид, а $s=0$ для уравнения (3), $s=1/4$ для уравнения (4) и $s=1/2$ для уравнения (5) [18].

Нелинейные уравнения, моделирующие распространение поляризованных волн, описываются системой Манаква [19, 20]:

$$\begin{aligned} i\partial_t \mathbf{p} &= -\partial_x^2 \mathbf{p} + 2(\mathbf{p}^t \mathbf{q}) \mathbf{p}, \\ i\partial_t \mathbf{q} &= \partial_x^2 \mathbf{q} - 2(\mathbf{p}^t \mathbf{q}) \mathbf{q} \end{aligned}$$

в простом случае и векторными производными нелинейными уравнениями при учете дополнительных эффектов. В частности, среди векторных уравнений нелинейной оптики упомянем векторное уравнение Кунду – Экхауса [21]:

$$\begin{aligned} i\partial_t \mathbf{p} &= -\partial_x^2 \mathbf{p} + 2i\alpha(\mathbf{p}^t \mathbf{q})\partial_x \mathbf{p} + \\ &+ (2\mathbf{p}^t \mathbf{q} - \alpha^2(\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 + 2i\alpha\mathbf{p}^t \partial_x \mathbf{q}) \mathbf{p}, \\ i\partial_t \mathbf{q} &= \partial_x^2 \mathbf{q} + 2i\alpha(\mathbf{p}^t \mathbf{q})\partial_x \mathbf{q} - \\ &- (2\mathbf{p}^t \mathbf{q} - \alpha^2(\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 - 2i\alpha\partial_x \mathbf{p}^t \mathbf{q}) \mathbf{q}, \end{aligned}$$

где α – числовой параметр, а также векторное уравнение Каупа – Ньюэлла:

$$\begin{aligned} i\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{xx} - 2i(\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{p}_x - 2i(\mathbf{p}\mathbf{q}^t)_x \mathbf{p} &= 0, \\ i\mathbf{q}_t + \mathbf{q}_{xx} - 2i(\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{q}_x - 2i(\mathbf{p}\mathbf{q}^t)_x \mathbf{q} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

векторное уравнение Чень – Ли – Лью:

$$\begin{aligned} i\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{xx} - 2i(\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{p}_x &= 0, \\ i\mathbf{q}_t + \mathbf{q}_{xx} - 2i(\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{q}_x &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

и векторное уравнение Герджикова – Иванова:

$$\begin{aligned} i\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{xx} + 2i(\mathbf{p}^t \mathbf{q}_x)\mathbf{p} - 2(\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 \mathbf{p} &= 0, \\ i\mathbf{q}_t + \mathbf{q}_{xx} + 2i(\mathbf{q}^t \mathbf{p}_x)\mathbf{q} + 2(\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 \mathbf{q} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В последних уравнениях \mathbf{p} и \mathbf{q} – это двухкомпонентные векторы. Нетрудно видеть, что все перечисленные скалярные и векторные уравнения являются различными модификациями уравнения (2) и имеют как общие черты, так и различия, позволяющие использовать их для моделирования сходных нелинейных явлений с некоторыми небольшими особенностями. Скалярные уравнения используются для описания распростране-

ния классических нелинейных волн в оптических каналах, а векторные двухкомпонентные – при описании процессов распространения нелинейных поляризованных волн. В настоящей работе мы рассмотрим специальный класс решений последних трех уравнений, который соответствует достаточно простым нетривиальным двухкомпонентным нелинейным волнам.

Векторные производные нелинейные уравнения

Пусть первый оператор пары Лакса имеет вид:

$$i\Psi_x = \mathbf{U}\Psi,$$

где

$$\mathbf{U} = -\lambda^2 \mathbf{J} + \lambda \mathbf{Q} + \mathbf{R} + s \mathbf{J},$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{p}^t \\ -\mathbf{q} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \mathbf{R} = \begin{pmatrix} -\mathbf{p}^t \mathbf{q} & \mathbf{0}^t \\ \mathbf{0} & \mathbf{q} \mathbf{p}^t \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{p}^t = (p_1, p_2), \mathbf{q}^t = (q_1, q_2).$$

По матрицам \mathbf{J} , \mathbf{Q} и \mathbf{R} построим матрицы \mathbf{V}_k , используя следующие равенства:

$$\mathbf{V}_{-1} = -\lambda \mathbf{J} + \mathbf{Q}, \mathbf{U}_0 = \lambda \mathbf{V}_{-1} + \mathbf{R}, \mathbf{V}_1 = \lambda \mathbf{U}_0 + \mathbf{V}_1^0,$$

$$\mathbf{V}_{k+1} = \lambda \mathbf{V}_k + \mathbf{V}_{k+1}^0, k \geq 1,$$

где

$$\mathbf{V}_{2k-1}^0 = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{H}_k^t \\ \mathbf{G}_k & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \mathbf{V}_{2k}^0 = \begin{pmatrix} -f_k & \mathbf{0}^t \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_k \end{pmatrix}, f_k = \text{Tr} \mathbf{F}_k, k \geq 1,$$

а элементы матриц \mathbf{V}_k^0 удовлетворяют следующим рекуррентным соотношениям:

$$\mathbf{H}_1 = -i\mathbf{p}_x + s\mathbf{p}, \mathbf{G}_1 = -i\mathbf{q}_x - s\mathbf{q},$$

$$\mathbf{H}_{k+1} = (\mathbf{F}_k^t + f_k \mathbf{I})\mathbf{p} - (\mathbf{p}\mathbf{q}^t + (\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{I})\mathbf{H}_k + s\mathbf{H}_k - i\partial_x \mathbf{H}_k,$$

$$\mathbf{G}_{k+1} = -(\mathbf{F}_k + f_k \mathbf{I})\mathbf{q} - (\mathbf{q}\mathbf{p}^t + (\mathbf{q}^t \mathbf{p})\mathbf{I})\mathbf{G}_k + s\mathbf{G}_k + i\partial_x \mathbf{G}_k,$$

$$\partial_x \mathbf{F}_k = \mathbf{q}\partial_x \mathbf{H}_k^t - \partial_x \mathbf{G}_k \mathbf{p}^t - i(\mathbf{q}\mathbf{p}^t + (\mathbf{q}^t \mathbf{p})\mathbf{I})\mathbf{G}_k \mathbf{p}^t -$$

$$-i\mathbf{q}\mathbf{H}_k^t (\mathbf{q}\mathbf{p}^t + (\mathbf{q}^t \mathbf{p})\mathbf{I}) + is(\mathbf{G}_k \mathbf{p}^t + \mathbf{q}\mathbf{H}_k^t).$$

В частности,

$$\mathbf{F}_1 = i(\mathbf{q}_x \mathbf{p}^t - \mathbf{q}\mathbf{p}_x^t) - (\mathbf{q}\mathbf{p}^t)^2 + 2s(\mathbf{q}\mathbf{p}^t),$$

$$f_1 = i(\mathbf{p}^t \mathbf{q}_x - \mathbf{p}^t \mathbf{p}_x) - (\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 + 2s(\mathbf{p}^t \mathbf{q}),$$

$$\mathbf{H}_2 = -\mathbf{p}_{xx} + 2i(\mathbf{p}^t \mathbf{q}_x)\mathbf{p} - 2(\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 \mathbf{p} +$$

$$+ 2s((\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{p} - i\mathbf{p}_x) + (s^2 - is_x)\mathbf{p},$$

$$\mathbf{G}_2 = \mathbf{q}_{xx} + 2i(\mathbf{q}^t \mathbf{p}_x)\mathbf{q} +$$

$$+ 2(\mathbf{p}^t \mathbf{q})^2 \mathbf{q} - 2s((\mathbf{p}^t \mathbf{q})\mathbf{q} + i\mathbf{q}_x) - (s^2 + is_x)\mathbf{q}. \quad (9)$$

Полагая, что второй оператор пары Лакса задается уравнением

$$i\Psi_t = \mathbf{W}_1 \Psi, \text{ где } \mathbf{W}_1 = \mathbf{V}_2 + s_1 \mathbf{J}, \partial_t s = \partial_x s_1,$$

из условия совместности получаем следующее интегрируемое нелинейное векторное дифференциальное уравнение:

$$\mathbf{p}_t = i\mathbf{H}_2 - is_1 \mathbf{p},$$

$$\mathbf{q}_t = i\mathbf{G}_2 + is_1 \mathbf{q}. \quad (10)$$

Из уравнений (9) и (10) вытекает следующее равенство:

$$\partial_t (\mathbf{p}^t \mathbf{q}) = \partial_x (f_1).$$

Следовательно, в уравнениях (10) можно положить

$$s = \alpha(\mathbf{p}^t \mathbf{q}), \quad s_1 = \alpha f_1,$$

где α есть некоторое действительное число. Уравнения (10) имеют наиболее простой вид в трех случаях: при $\alpha=0$, $\alpha=1$ и $\alpha=2$. При $\alpha=0$ уравнение (10) является векторным уравнением Герджикова – Иванова (8), при $\alpha=1$ – уравнением Чень – Ли – Лью (7), а при $\alpha=2$ – векторным уравнением Каупа – Ньюэлла.

Чтобы найти многофазные решения этих векторных уравнений, необходимо по матрицам \mathbf{V}_k построить матрицу монодромии:

$$\mathbf{M} = \mathbf{V}_n + \sum_{k=1}^{n-1} c_k \mathbf{V}_{n-k} + c_n \mathbf{U} + c_{n+1} \mathbf{V}_{-1} + \mathbf{J}_n, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{J}_n = \begin{pmatrix} -2c_{n+2} & 0 & 0 \\ 0 & c_{n+2} + c_{n+3} & c_{n+4} \\ 0 & c_{n+5} & c_{n+2} - c_{n+3} \end{pmatrix}.$$

Из уравнения (11) следует, что матрица \mathbf{M} является многочленом степени $n+2$ по спектральному параметру λ . Из уравнения

$$i\mathbf{M}_x + \mathbf{M}\mathbf{U} - \mathbf{U}\mathbf{M} = \mathbf{0}$$

вытекают стационарные уравнения, которым удовлетворяют элементы матриц \mathbf{V}_k . В простей-

ших случаях эти уравнения можно решить и найти зависимость компонент нелинейной волны от переменной x .

Заметим, что спектральные данные, которыми в данном случае является спектральная кривая, также зависят от элементов матрицы \mathbf{M} , характеризующее уравнение которой и является уравнением спектральной кривой [22]:

$$R(\mu, \lambda) = \det(\mu \mathbf{I} - \mathbf{M}(\lambda)) = \mu^3 + A(\lambda)\mu + B(\lambda) = 0,$$

где

$$A(\lambda) = -\frac{1}{3}\lambda^{2n+4} - \frac{2c_2}{3}\lambda^{2n+2} + \sum_{k=2}^{n+2} A_k \lambda^{2n+4-2k},$$

$$B(\lambda) = \frac{2}{27}\lambda^{3n+6} + \frac{2c_2}{9}\lambda^{3n+4} + \sum_{k \geq 2} B_k \lambda^{3n+6-2k}.$$

Заметим, что коэффициенты A_k и B_k являются дополнительными интегралами многофазных решений. При этом старшие коэффициенты A_k и B_k при $n \geq 1$ связаны следующими равенствами:

$$B_2 + \frac{1}{3}A_2 = \frac{1}{9}c_2^2, \quad B_3 + \frac{1}{3}A_3 + \frac{1}{3}c_2A_2 = -\frac{1}{27}c_2^3.$$

Из этих условий следует, что дискриминант многочлена $R(\mu)$ является многочленом от λ степени $6n+4$. Следовательно, в общем случае спектральная кривая имеет $6n+4$ точек ветвления (в общем случае при данном виде коэффициентов уравнения спектральной кривой бесконечно удаленные точки не являются точками ветвления). Используя формулу Римана – Гурвица, получаем, что в общем случае род спектральной кривой равен $g=3n$. То есть уже при $n=1$ род спектральной кривой равен $g=3$, если эта кривая не имеет вырождений и специализаций.

Простейшие нетривиальные решения векторных нелинейных уравнений

Положим $n=1$. В этом случае матрица монодромии определяется следующим равенством:

$$\mathbf{M} = \mathbf{V}_1 + c_2 \mathbf{V}_{-1}.$$

Для данной матрицы монодромии стационарные уравнения, которым удовлетворяют компоненты решения, имеют вид:

$$\partial_x^2 p_1 + i(c_2 - 2p_1 q_1 - p_2 q_2 + 2s) \partial_x p_1 - ip_1 q_2 \partial_x p_2 + ((c_2 + s)(2p_1 q_1 + 2p_2 q_2 - s) + is_x) p_1 = 0,$$

$$\partial_x^2 p_2 + i(c_2 - p_1 q_1 - 2p_2 q_2 + 2s) \partial_x p_2 - ip_2 q_1 \partial_x p_1 + ((c_2 + s)(2p_1 q_1 + 2p_2 q_2 - s) + is_x) p_2 = 0,$$

$$\begin{aligned} \partial_x^2 q_1 - i(c_2 - 2p_1 q_1 - p_2 q_2 + 2s) \partial_x q_1 + ip_2 q_1 \partial_x q_2 + \\ + ((c_2 + s)(2p_1 q_1 + 2p_2 q_2 - s) - is_x) q_1 = 0, \\ \partial_x^2 q_2 - i(c_2 - p_1 q_1 - 2p_2 q_2 + 2s) \partial_x q_2 + ip_1 q_2 \partial_x q_1 + \\ + ((c_2 + s)(2p_1 q_1 + 2p_2 q_2 - s) - is_x) q_2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Сделав в уравнениях (12) замену

$$p_j = \sqrt{u_j} \exp\left\{-\int \frac{w_j}{2u_j} dx\right\}, \quad q_j = \sqrt{u_j} \exp\left\{\int \frac{w_j}{2u_j} dx\right\},$$

перейдем от компонент векторов к их симметричным и антисимметричным комбинациям

$$u_j = p_j q_j, \quad w_j = p_j \partial_x q_j - q_j \partial_x p_j.$$

После подстановки и упрощения имеем:

$$\begin{aligned} w_1 = ic_5 + i(c_2 - u_1 - u_2 + 2s)u_1, \\ w_2 = ic_6 + i(c_2 - u_1 - u_2 + 2s)u_2 \end{aligned} \quad (13)$$

и

$$\begin{aligned} 2u_1 \partial_x^2 u_1 - (\partial_x u_1)^2 + (c_2^2 - 2(c_5 + c_6) + 4c_2 u_2 + 3u_2^2) u_1^2 + \\ + (4c_2 + 6u_2) u_1^3 + 3u_1^4 - c_5^2 = 0, \\ 2u_2 \partial_x^2 u_2 - (\partial_x u_2)^2 + (c_2^2 - 2(c_5 + c_6) + 4c_2 u_1 + 3u_1^2) u_2^2 + \\ + (4c_2 + 6u_1) u_2^3 + 3u_2^4 - c_6^2 = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь c_5 и c_6 являются постоянными интегрирования. Заметим, что уравнения (14) не содержат функции s , которая теперь содержится только в уравнениях (13).

Коэффициенты уравнения спектральной кривой при $n=1$ имеют вид:

$$A(\lambda) = -\frac{1}{3}\lambda^6 - \frac{2c_2}{3}\lambda^4 + A_2 \lambda^2 + A_3,$$

$$B(\lambda) = \frac{2}{27}\lambda^9 + \frac{2c_2}{9}\lambda^7 + B_2 \lambda^5 + B_3 \lambda^3 + B_4 \lambda,$$

где

$$\begin{aligned} A_2 = -\frac{c_2^2 + 3c_5 + 3c_6}{3}, \\ A_3 = \frac{(\partial_x u_1)^2}{4u_1} + \frac{(\partial_x u_2)^2}{4u_2} + \frac{1}{4}(u_1^3 + u_2^3) + \\ + \frac{1}{4}(2c_2 + 3u_2)u_1^2 + \frac{1}{4}(2c_2 + 3u_1)u_2^2 + c_2 u_1 u_2 + \\ + \frac{c_2^2 - 2c_5 - 2c_6}{4}(u_1 + u_2) + \frac{c_5^2}{4u_1} + \frac{c_6^2}{4u_2} - \frac{c_2(c_5 + c_6)}{2}, \end{aligned}$$

$$B_2 = \frac{2c_2^2 + 3c_5 + 3c_6}{9}, B_3 = -\frac{1}{3}A_3 + \frac{2c_2^3}{27} + \frac{c_2(c_5 + c_6)}{3},$$

$$B_4 = -\frac{c_2}{3}A_3 - \frac{u_2(\partial_x u_1)^2}{4u_1} - \frac{u_1(\partial_x u_2)^2}{4u_2} +$$

$$+ \frac{1}{2}(\partial_x u_1)(\partial_x u_2) - \frac{c_5^2 u_2}{4u_1} - \frac{c_6^2 u_1}{4u_2} + \frac{1}{2}c_5 c_6.$$

Нетрудно видеть, что коэффициенты уравнения спектральной кривой тоже не зависят от функционального параметра s . Следовательно, амплитуды решений векторных форм производного нелинейного уравнения Шредингера не зависят от конкретного типа уравнения. Соответственно, от типа уравнения также не зависят коэффициенты уравнений спектральных кривых многофазных решений этих уравнений. Напомним, что аналогичным свойством обладают решения скалярных форм производного нелинейного уравнения Шредингера [18].

Для дальнейшего упрощения стационарных уравнений и уравнений для коэффициентов спектральной кривой перейдем от функций u_1, u_2 к функциям u, v : $u = u_1 + u_2, v = u_1 - u_2$. В новых обозначениях выражения для коэффициентов уравнения спектральной кривой и стационарные уравнения (14) имеют следующий вид:

$$A_3 = \frac{1}{4}(u + c_2)(u^2 + c_2 u - 2(c_5 + c_6)) +$$

$$(2(c_5^2 + c_6^2) + (\partial_x u)^2) +$$

$$+ \frac{(\partial_x v)^2 u - 2(c_5^2 - c_6^2 + (\partial_x u)(\partial_x v))v}{4(u^2 - v^2)},$$

$$Bb_4 = -\frac{c_2}{3}A_3 -$$

$$\frac{((c_5 + c_6)^2 + (\partial_x u)^2)v^2 + ((c_5 - c_6)^2 + (\partial_x v)^2)u^2}{4(u^2 - v^2)}$$

$$- \frac{(c_5^2 - c_6^2 + (\partial_x u)(\partial_x v))uv}{2(u^2 - v^2)}$$

и

$$u\partial_x^2 v + v\partial_x^2 u - (\partial_x u)(\partial_x v) +$$

$$+ (c_2^2 - 2(c_5 + c_6) + 4c_2 u + 3u^2)uv + c_6^2 - c_5^2 = 0,$$

$$2u\partial_x^2 u + 2v\partial_x^2 v - (\partial_x u)^2 - (\partial_x v)^2 +$$

$$+ (c_2^2 - 2(c_5 + c_6) + 4c_2 u + 3u^2)(v^2 + u^2) - 2(c_5^2 + c_6^2) = 0.$$

Упрощая стационарные уравнения с использованием выражений для коэффициентов для уравнения спектральной кривой, получаем следующие равенства:

$$\partial_x^2 u = -2u^3 - 3c_2 u^2 -$$

$$- (c_2^2 - 2(c_5 + c_6))u + 2A_3 + c_2(c_5 + c_6) \quad (15)$$

и

$$6v\partial_x^2 v - 3(\partial_x v)^2 + 3(c_2^2 - 2(c_5 + c_6) + 4c_2 u + 3u^2)v^2 -$$

$$- 12B_4 - 4c_2 A_3 - 3(c_5 - c_6)^2 = 0. \quad (16)$$

Интегрируя (15), имеем:

$$(\partial_x u)^2 = -u^4 - 2c_2 u^3 - (c_2^2 - 2(c_5 + c_6))u^2 +$$

$$+ (4A_3 + 2c_2(c_5 + c_6))u + c_7, \quad (17)$$

где $c_7 \in \mathbb{R}$ есть постоянная интегрирования. Следовательно, $u(x)$ есть эллиптическая функция с простыми полюсами или ее вырождение. Постоянная B_4 связана с постоянной c_7 с помощью следующего соотношения:

$$B_4 = \frac{1}{4}c_7 + \frac{1}{4}(c_5 + c_6)^2 - \frac{1}{3}c_2 A_3.$$

Следуя [22], сделаем в уравнении (16) замену $v = \hat{v}u$. После упрощения с использованием соотношений (15), (16) и (17) имеем следующее дифференциальное уравнение на функцию \hat{v} :

$$(\partial_x \hat{v})^2 = \frac{c_7 \hat{v}^2 + 2(c_5^2 - c_6^2)\hat{v} - c_7 - 2(c_5^2 + c_6^2)}{u^2}. \quad (18)$$

Интегрируя (18) при $c_7 \neq 0$, получаем:

$$\hat{v} = \frac{\sqrt{((c_5 + c_6)^2 - \kappa^2)((c_5 - c_6)^2 - \kappa^2)}}{\kappa^2} \sin(\kappa\theta) + \frac{c_5^2 - c_6^2}{\kappa^2},$$

где $\partial_x \theta = u^{-1}, \kappa^2 = -c_7$. То есть при $c_7 \neq 0$ величина \hat{v} ограничена и колеблется нелинейным образом. Следовательно, выбирая ограниченные решения уравнения (17), мы будем иметь ограниченную функцию v и, соответственно, ограниченные компоненты нелинейных волн, удовлетворяющих уравнениям (6)–(8). Примеры некоторых решений уравнений (17) и (18) при $c_7 \neq 0$ можно найти в работе [22].

Резонанс

Вместе с тем при $c_7=0$ и $A_3 = -c_2(c_5 + c_6)/2$ уравнения (17) и (18) довольно сильно упрощаются и дают новые решения, по которым можно построить достаточно простые решения уравнений (6)–(8). В частности, уравнение (17) принимает вид:

$$(\partial_x u)^2 = u^2 (2(c_5 + c_6) - 2c_2 - c_2^2 - u^2).$$

Полагая $c_5 + c_6 = (a^2 + 2c_2 + c_2^2)/2$, получаем, что $u(x)$ является гиперболической функцией

$$u(x) = \frac{a}{\cosh(ax + \phi_1(t))}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (18) при $c_7=0$ и интегрируя, имеем:

$$\hat{v} = \frac{c_5^2 + c_6^2}{c_5^2 - c_6^2} + \frac{c_5^2 - c_6^2}{2} \left(\frac{1}{a^2} \sinh(ax + \phi_1(t)) + \phi_2(t) \right)^2. \quad (20)$$

Из уравнений (6) – (8) вытекает, что $\phi_1(t) = -ac_2 t$ и $\phi_2(t) = t$. Из формулы (20) следует, что при данных значениях параметров функции \hat{v} и, соответственно, v неограниченно возрастают с ростом x . Следовательно, неограниченно возрастают и амплитуды компонент решения.

Заключительные замечания

В работе [22] было показано, что при c_7 , отличном от нуля, существуют ограниченные решения в виде векторов, длина которых изменяется по законам распространения светлых или темных солитонов, а ориентация слабо колеблется вокруг некоторого направления. Вместе с тем формула (20) указывает на наличие в рассмотренной нелинейной интегрируемой модели явление параметрического резонанса, когда при некоторых значениях параметров модели амплитуда компонент решения неограниченно возрастает и нелинейная модель перестает адекватно отражать действительность. Этот особый случай можно определить по уравнению спектральной кривой, род которой в данном случае уменьшается до $g=1$ с $g=3$ в общем случае.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ахмедиев Н. Н., Анкевич А. Солитоны: Нелинейные импульсы и пучки. М.: Физматлит, 2003. 304 с.
2. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны: от световодов к фотонным кристаллам. М.: Физматлит, 2005. 648 с.
3. Калоджеро Ф., Дегасперис А. Спектральные преобразования и солитоны. М.: Мир, 1985. 472 с.
4. Солитоны и нелинейные волновые уравнения / Р. Додд, Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Морис. М.: Мир, 1988. 694 с.
5. Делицын А. Л. Быстрые алгоритмы решения обратной задачи рассеяния для системы уравнений Захарова – Шабата и их приложения // Матем. заметки. 2022. Т. 112, № 2. С. 198–217.
6. Polarization-division multiplexing based on the nonlinear fourier transform / J.-V. Goossens, M. I. Yousefi, Y. Jaouën, H. Haffermann // Optic express. 2017. Vol. 25, № 22. P. 26437–26452.
7. Experimental demonstration of nonlinear frequency division multiplexing transmission with neural network receiver / S. Gaiarin [et al.] // Journal of lightwave technology. 2020. Vol. 38, № 23. P. 6465–6473.
8. Dual polarization nonlinear Fourier transform-based optical communication system / S. Gaiarin [et al.] // Optica. 2018. Vol. 5, № 3. P. 263–270.
9. Polarization-multiplexed nonlinear inverse synthesis with standard and reduced-complexity NFT processing / S. Civelli, S. K. Turitsyn, M. Secondini, J. E. Prilepsky // Optic express. 2018. Vol. 26, № 13. P. 17360–17377.
10. Puttnam B. J., Rademacher G., Luis R. S. Space-division multiplexing for optical fiber communications // Optica. 2021. Vol. 8, № 9. P. 1186–1203.
11. Ахмедиев Н. Н., Корнеев В. И. Модуляционная неустойчивость и периодические решения нелинейного уравнения Шредингера // ТМФ. 1986. Т. 69, № 2. С. 189–194.
12. Захаров В. Е., Шабат А. Б. Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной автомодуляции волн в нелинейной среде // ЖЭТФ. 1971. Т. 61, № 1. С. 118–134.
13. The inverse scattering transform-fourier analysis for nonlinear problems / M. J. Ablowitz [et al.] // Studies in appl. math. 1974. Vol. 53, № 4. P. 249–315.
14. Kaup D. J., Newell A. C. An exact solution for a derivative nonlinear Schrödinger equation // J. math. phys. 1978. Vol. 19, № 4. P. 798–801.
15. Chen H. H., Lee Y. C., Liu C. S. Integrability of nonlinear Hamiltonian systems by inverse scattering method. Special issue on solitons in physics // Physica scripta. 1979. Vol. 20, № 3-4. P. 490–492.
16. Gerdjikov V. S., Ivanov M. I. The quadratic bundle of general form and the nonlinear evolution equations. I: Expansions over the “squared” solutions are generalized Fourier transforms // Bulgarian j. phys. 1983. Vol. 10, № 1. P. 13–26.
17. Gerdjikov V. S., Ivanov M. I. A quadratic pencil of general type and nonlinear evolution equations. II: Hierarchies of Hamiltonian structures // Bulgarian j. phys. 1983. Vol. 10, № 2. P. 130–143.

18. Smirnov A. O. Spectral curves for the derivative nonlinear Schrödinger equations // *Symmetry*. 2021. Vol. 13, № 7. P. 1203.
19. Manakov S. V. On the theory of two-dimensional stationary self-focusing of electromagnetic waves // *Sov. phys. JETP*. 1974. Vol. 38, № 2. P. 248–253.
20. Smirnov A. O., Gerdjikov V. S., Matveev V. B. From generalized Fourier transforms to spectral curves for the Manakov hierarchy. II: Spectral curves for the Manakov hierarchy // *Eur. phys. j. plus*. 2020. Vol. 135. P. 561.
21. Smirnov A. O., Caplieva A. A. Vector form of Kundu – Eckhaus equation and its simplest solutions // *Ufa mathematical journal*. 2023. Vol. 15, № 3. P. 146–163.
22. Smirnov A. O., Frolov E. A., Dmitrieva L. L. On a hierarchy of vector derivative nonlinear Schrödinger equations // *Symmetry*. 2024. Vol. 16, № 1. P. 60.

REFERENCES

1. Akhmediev N. N., Ankiewicz A. Solitons, nonlinear pulses and beams. Chapman & Hall; 1997. 336 p.
2. Kivshar Yu. S., Agrawal G. P. Optical solitons. From fibers to photonic crystals. Academic Press; 2003. 540 p.
3. Calogero F., Degasperis A. Spectral transform and solitons: tools to solve and investigate nonlinear evolution equations. Amsterdam, N. Y., Oxford: North-Holland Publ. Comp.; 1982. 516 p.
4. Solitons and nonlinear wave equations / R. K. Dodd, J. C. Eilbeck, J. D. Gibbon, H. Morris. Academic press, Inc.; 1982. 648 p.
5. Delitsyn A. L. Fast algorithms for solving the inverse scattering problem for the Zakharov – Shabat system of equations and their applications. *Math. notes*. 2022;112(2):199–214.
6. Goossens J.-V., Yousefi M. I., Jaouën Y., Haffermann H. Polarization-division multiplexing based on the nonlinear fourier transform. *Optic express*. 2017;25(22):26437–26452.
7. Gaiarin S., Perego A. M., da Silva E. P., Da Ros F., Zibar D. Experimental demonstration of nonlinear frequency division multiplexing transmission with neural network receiver // *Journal of lightwave technology*. 2020;38(23):6465–6473.
8. Gaiarin S., Perego A. M., da Silva E. P., Da Ros F., Zibar D. Dual polarization nonlinear Fourier transform-based optical communication system. *Optica*. 2018;5(3):263–270.
9. Civelli S., Turitsyn S. K., Secondini M., Prilepsky, J. E. Polarization-multiplexed nonlinear inverse synthesis with standard and reduced-complexity NFT processing. *Optic express*. 2018;26(13):17360–17377.
10. Puttnam B. J., Rademacher G., Luis R. S. Space-division multiplexing for optical fiber communications. *Optica*. 2021;8(9):1186–1203.
11. Akhmediev N. N., Korneev V. I. Modulation instability and periodic solutions of the nonlinear Schrödinger equation. *Theor. math. phys.* 1986;69(2):1089–1093.
12. Zakharov V. E., Shabat A. B. Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional selfmodulation of waves in nonlinear media. *Sov. phys. JETP*. 1921;34(1):62–67.
13. Ablowitz M. J., Kaup D. J., Newell A. C., Segur H. The inverse scattering transform-fourier analysis for nonlinear problems. *Studies in appl. Math.* 1974;53(4):249–315.
14. Kaup D. J., Newell A. C. An exact solution for a derivative nonlinear Schrödinger equation. *J. math. phys.* 1978;19(4):798–801.
15. Chen H. H., Lee Y. C., Liu C. S. Integrability of nonlinear Hamiltonian systems by inverse scattering method. Special issue on solitons in physics. *Physica scripta*. 1979;20(3-4):490–492.
16. Gerdjikov V. S., Ivanov M. I. The quadratic bundle of general form and the nonlinear evolution equations. I: Expansions over the “squared” solutions are generalized Fourier transforms. *Bulgarian j. phys.* 1983;10(1):13–26.
17. Gerdjikov V. S., Ivanov M. I. A quadratic pencil of general type and nonlinear evolution equations. II: Hierarchies of Hamiltonian structures. *Bulgarian j. phys.* 1983;10(2):130–143.
18. Smirnov A. O. Spectral curves for the derivative nonlinear Schrödinger equations. *Symmetry*. 2021;13(7):1203.
19. Manakov S. V. On the theory of two-dimensional stationary self-focusing of electromagnetic waves. *Sov. phys. JETP*. 1974;38(2):248–253.
20. Smirnov A. O., Gerdjikov V. S., Matveev V. B. From generalized Fourier transforms to spectral curves for the Manakov hierarchy. II: Spectral curves for the Manakov hierarchy. *Eur. phys. j. plus*. 2020;135:561.
21. Smirnov A. O., Caplieva A. A. Vector form of Kundu – Eckhaus equation and its simplest solutions. *Ufa mathematical journal*. 2023;15(3):146–163.
22. Smirnov A. O., Frolov E. A., Dmitrieva L. L. On a hierarchy of vector derivative nonlinear Schrödinger equations. *Symmetry*. 2024;16(1):60.

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., Dr. Sci. 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 23.03.2024

Поступила после рецензирования 25.03.2024

Принята к публикации 04.04.2024

Received 23.03.2024

Revised 25.03.2024

Accepted 04.04.2024

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Чабаненко А. В.** Численное моделирование процесса аддитивного производства посредством калибровочной модели методом возрождения упругого слоя..... 5
- Иванов М. В., Тушавин В. А.** Применение искусственных нейронных сетей в управлении результативностью технического документооборота 11
- Винниченко А. В.** Тактика проектирования бережливых производственных систем 18
- Пашина Е. А., Назаревич С. А.** Организационный дизайн эвристическими моделями 22
- Верховская А. И., Назаревич С. А.** Модели обеспечения качества прогнозирования несоответствий в производственной системе 26

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

- Майоров Е. Е.** Анализ сложных композитных материалов с содержанием метакриловых мономеров спектрофотометром, работающим в диапазоне длин волн 200–1100 нм 32
- Щеников Я. А.** Имитационная модель функционирования установки по производству деталей методом послойного наплавления 38
- Епифанцев К. В.** Разработка комплексной сканирующей системы для определения дефектов формы 44
- Жильникова Н. А., Шишкин И. А., Березина А. А.** Эколого-технологическое нормирование как эффективный инструмент обеспечения качества функционирования системы водоотведения производства 53

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Огурцов И. Я., Первухин Д. А., Афанасьева О. В.** Подход к формированию сил Кориолиса для поступательного и углового

CONTENTS

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. PRODUCTION ORGANIZATION

- Chabanenko A. V.** Numerical simulation of the additive manufacturing process by means of a calibration model using the elastic layer regeneration method 5
- Ivanov M. V., Tushavin V. A.** Application of artificial neural networks in performance management of technical document management 11
- Vinnichenko A. V.** The tactics of designing lean production systems 18
- Pashina E. A., Nazarevich S. A.** Organizational design by heuristic models 22
- Verkhovskaya A. I., Nazarevich S. A.** Quality assurance models for forecasting nonconformities in the production system 26

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

- Maierov E. E.** Analysis of complex composite materials containing methacrylic monomers with a spectrophotometer operating in the wavelength range of 200–1100 nm 32
- Shchenikov Ya. A.** Simulation model of the functioning of an installation for the parts production using the fused deposition modeling method 38
- Epifantsev K. V.** Development of a comprehensive scanning system for detecting shape defects 44
- Zhilnikova N. A., Shishkin I. A., Berezina A. A.** Environmental and technological regulating as an effective tool for ensuring the quality of operation of the production water disposal system 53

FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLIED RESEARCH

- Ogurtsov I. Ya., Pervukhin D. A., Afanaseva O. V.** Approach to the Coriolis forces formation for translational and angular displacement

перемещения материального объекта
в инерциальном пространстве..... 61

Дик О. Е., Фролова Е. А., Акилин А. С.
Построение границы области возникнове-
ния двухпериодических колебаний
в нелинейной модели сенсорного
нейрона 72

Смирнов А. О. О нелинейном резонансе
поляризованных оптических волн..... 78

of a material object in inertial space 61

Dick O. E., Frolova E. A., Akilin A. S.
Constructuon of the boundary of the
two-period oscillation region in the nonlinear
model of sensory neuron..... 72

Smirnov A. O. On the nonlinear resonance
of polarized optical waves 78

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 надстрочно 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, подрисуночные подписи 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