



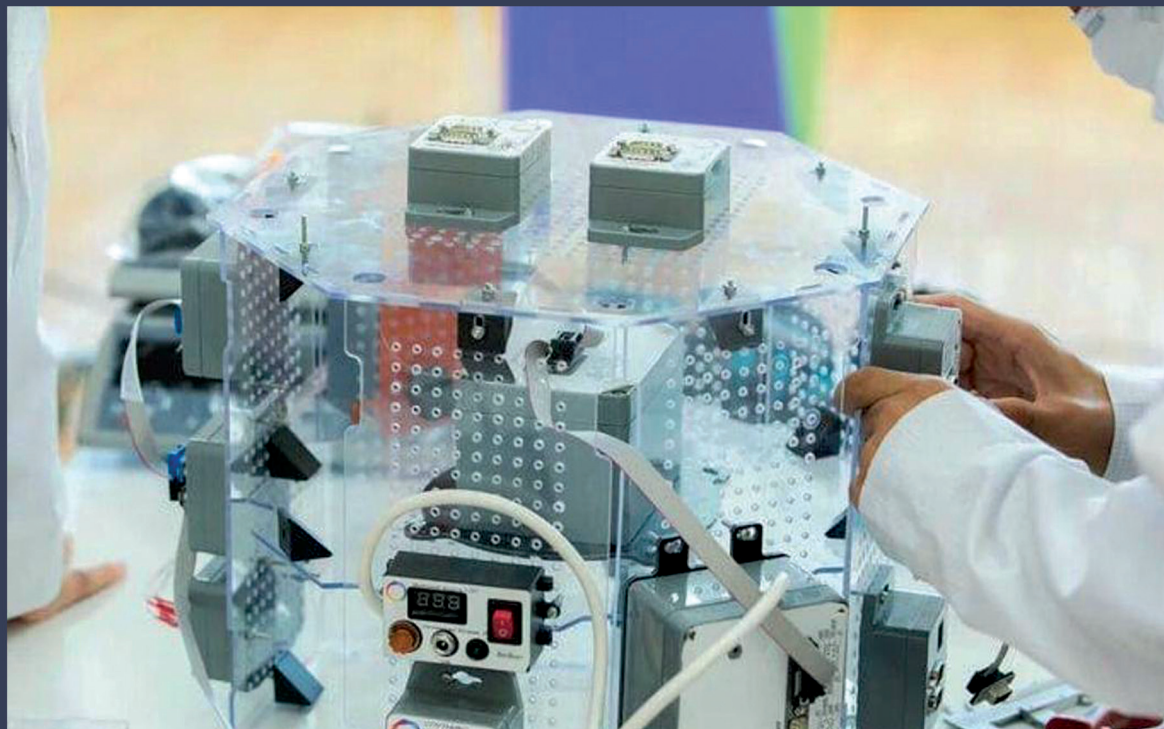
ISSN 2949-0693

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 5 • 2023

INNOVATIVE INSTRUMENTATION





ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 5 • 2023

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 2, no. 5 • 2023



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 25.10.2023. Signed for printing: 31.10.2023. 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

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 25.10.2023. Дата выхода в свет: 31.10.2023. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 12. Усл. печ. л. 11,5. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 437.

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.

Проблемы настройки датчиков RoundTest RA-120P по углу наклона и по высотным параметрам

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. Представлены результаты исследования влияния на точность измерений угла наклона щупа с различным шагом. Также проведен эксперимент по зависимости результата центрирования от взаимного расположения первого и второго касания детали щупом кругломера (по нормативу калибровки обязательны две точки касания). Получены результаты, однозначно определяющие оптимальные значения двух параметров при проведении центрирования/нивелирования. Полученные результаты будут полезны при калибровке и юстировке кругломера RoundTest RA-120P.

Ключевые слова: кругломер, центрирование, нивелирование, отклонения формы, щуп

Для цитирования: Епифанцев К. В. Проблемы настройки датчиков RoundTest RA-120P по углу наклона и по высотным параметрам // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 5–10. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-5-10.

Original article

Problems with setting up RoundTest RA-120P sensors by inclination angle and height parameters

Kirill V. Epifancev¹

✉ 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 paper presents the results of a study of the influence of two factors on the accuracy of measurements – the angle of inclination of the probe with different pitches, and also an experiment was conducted on the dependence of the centering result on the relative position of the first and second contact of the part with the caliper probe (according to the calibration standard, two points of contact are required). Results were obtained that clearly determine the optimal values of two parameters when performing centering/leveling. The results obtained will be useful when calibrating and adjusting the RoundTest RA-120P roundness meter.

Keywords: roundmeter, centering, leveling, shape deviation, probe

For citation: Epifancev K. V. Problems with setting up RoundTest RA-120P sensors by inclination angle and height parameters. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):5–10. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-5-10.

Введение

Современное машиностроение предъявляет к приборам для измерения отклонений от круглости весьма жесткие требования [1]. Они должны обладать высокой точностью, производительностью, простотой конструкции и надежностью в эксплуатации.

Измерение круглости в последнее время стало самостоятельным и важным разделом технической метрологии, охватывающим широкий круг вопросов – от разработки специальных средств измерений до методов математического анализа и оценки результатов измерений.

Цель исследования – оценка влияния на точность измерений отклонений формы кругломера, которая зависит от двух факторов – угла

наклона щупа и относительного расположения точек касания щупом детали при выполнении ее центрирования/нивелирования.

Материал и методы исследования

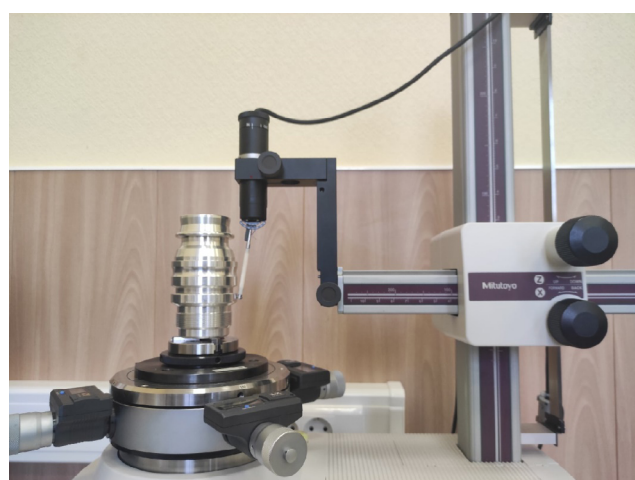
Эксперименты в рамках исследования были проведены на кругломере Mitutoyo RoundTest RA-120P (рис. 1) – приборе для измерения отклонений формы и взаимного расположения поверхностей [2].

Вид исследуемой детали, закрепленной на предметном столе кругломера, показан на рис. 2.

Первый этап исследования направлен на определение зависимости точности измерений от угла щупа относительно вертикальной оси. Центри-



• *Рис. 1. Работа на кругломере RoundTest RA-120P*
 • *Fig. 1. Working on a RoundTest RA-120P*



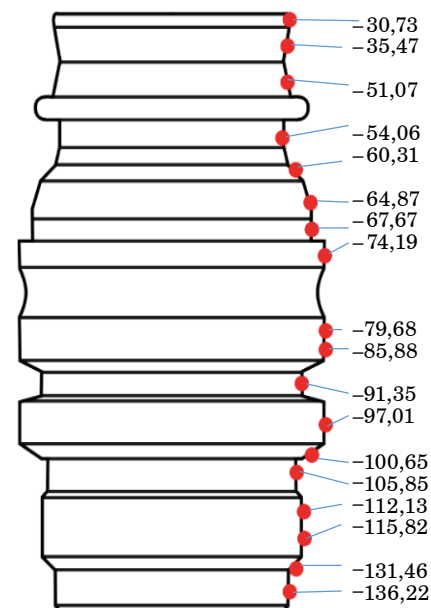
• *Рис. 2. Закрепленная в патроне рабочего стола кругломера типовая деталь*
 • *Fig. 2. A typical part fixed in the cartridge of the working table of the round meter*

рование/нивелирование выполняли для углов наклона щупа от 5 до 40° с шагом 5°, всего девять углов. Анализируемым результатом является значение центрирования/нивелирования, измеряемое в микрометрах.

Второй этап исследования состоял в определении оптимального расстояния между точками касания щупа поверхности детали в процессе измерения процедуры центрирования/нивелирования. Для исследуемой детали выбрано девять пар точек, расположение которых показано на рис. 3.

Процедура центрирования/нивелирования закрепленной в патроне детали, являющаяся основной для всего исследования, включает в себя следующие этапы [3–5]:

1) предварительные сканирования двух сечений на детали;



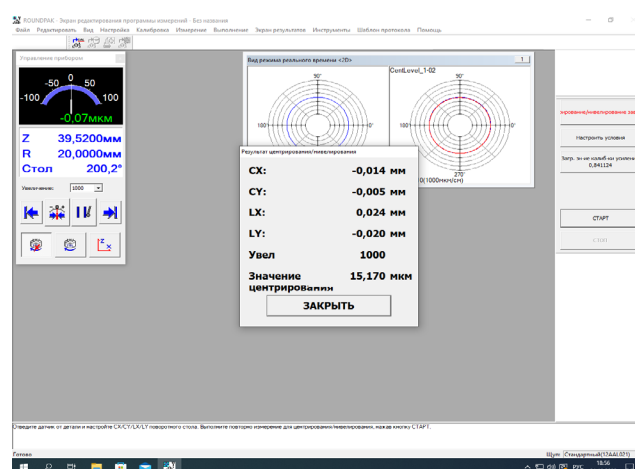
• *Рис. 3. Точки, в которых проводили измерения на втором этапе*
 • *Fig. 3. Points at which measurements were carried out at the second stage*

2) получение результатов – значения поправок по четырем микрометрическим головкам и величины центрирования;

3) завершение операции центрирования/нивелирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Первое значение угла наклона щупа для первого этапа исследования – 5°. Значение центрирования в этом случае равно 15,17 мкм (рис. 4).



• *Рис. 4. Результат центрирования/выравнивания при угле 5°*
 • *Fig. 4. Result of centering/alignment at an angle of 5°*

Результаты измерений для всех девяти углов наклона обобщены в табл. 1. Следует отметить, что при величине угла наклона 40° щуп не касался поверхностей детали.

На втором этапе исследования центрирование/ нивелирование проводили по точкам, показанным на рис. 3, с последовательным уменьшением расстояния между ними [6]. Значения угла наклона были постоянными. Первая пара точек – с относительными значениями координат по шкале Z кругломера $-30,73$ и $-136,22$. Последняя пара точек – с координатами $-79,68$ и $-85,88$. Сводные результаты измерений обобщены в табл. 2.

Рассмотрим результаты первого этапа исследования. Из полученного графика (рис. 5) видно, что оптимальными значениями угла наклона щупа являются 5 и 10° .

Графическое представление результатов второго этапа (рис. 6) исследования показывает, что минимальные значения центрирования соответствуют парам точек 4–6. Максимальное значение соответствует парам точек 8 и 9, для которых расстояние между точками минимально.

По результатам центрирования выявлено, что самое низкое его значение наблюдается в пятой паре точек, т. е. при значениях $-105,85$ и $-60,31$ соответственно (рис. 7).

Если взять всю длину детали за 100% (110 мм), то можно определить, на какой процент от начала координат стоит откладывать две оптимальные точки, и установить коэффициент для удобства дальнейших вычислений [7].

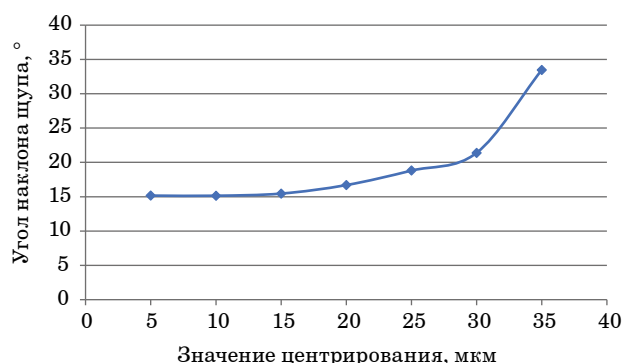
За начало и конец отсчета примем значения координат -140 и -30 мм соответственно. Тогда две оптимальные точки (рис. 7) будут располагаться на детали на 31 и $72,5\%$ от точки, принятой за начало отсчета длины этой детали. В про-

- Таблица 1. Значения центрирования в зависимости от угла наклона щупа
- Table 1. Centering values depending on the angle of the probe

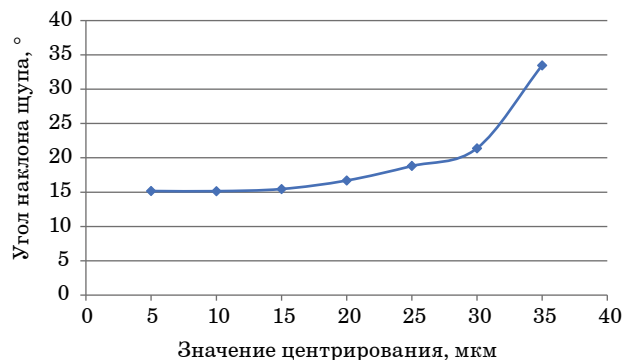
Угол наклона щупа, °	Значение центрирования, мкм
5	15,17
10	15,15
15	15,46
20	16,7
25	18,81
30	21,39
35	–
35	33,46
40	–

- Таблица 2. Результаты измерений
- Table 2. Measurement results

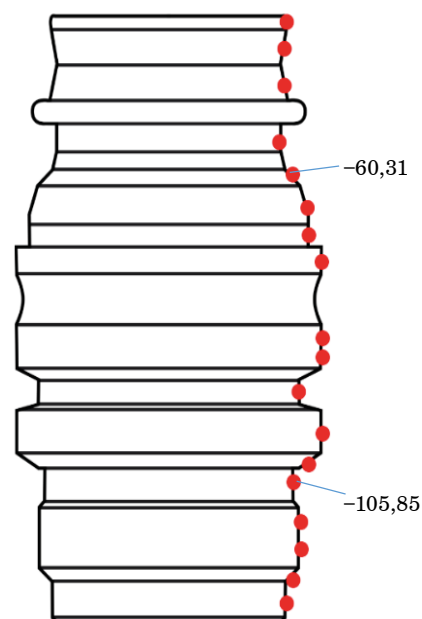
Номер пары точек	Значение, мм	Величина центрирования, мкм
1	$-30,73$	25,24
	$-136,22$	
2	$-35,47$	24,52
	$-131,46$	
3	$-51,07$	34,95
	$-115,82$	
4	$-54,06$	16,47
	$-112,13$	
5	$-60,31$	13,94
	$-105,85$	
6	$-64,87$	14,63
	$-100,65$	
7	$-67,67$	34,18
	$-97,01$	
8	$-74,19$	63,93
	$-91,35$	
9	$-79,68$	65,35
	$-85,88$	



- Рис. 5. График зависимости значения центрирования от угла наклона щупа
- Fig. 5. Graph of the dependence of the centering value on the angle of inclination of the probe



- Рис. 6. График зависимости значения центрирования от расположения точек на детали
- Fig. 6. Graph of the dependence of the centering value on the location of points on the part



• *Рис. 7. Расположение двух точек, при которых следует проводить измерения на данной детали*
 • *Fig. 7. The location of the two points at which measurements should be made on this part*

цессе измерения именно в этих местах значение центрирования окажется наименьшим.

Таким образом, выведем формулу для определения местонахождения конкретных точек, в которых проведутся самые достоверные измерения:

$$S_1 = 0,31\alpha; \quad (1)$$

$$S_2 = 0,725\alpha; \quad (2)$$

где S_1 – первая точка; S_2 – вторая точка; α – длина детали.

Также по результатам экспериментов было выявлено, что при правильном выборе угла наклона щупа и точек касания детали время, затраченное на подготовку кругломера к измерениям, сокращается в два раза, что значительно повышает эффективность измерений.

До использования новой методики время на калибровку составляло:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 15 \text{ мин}, \quad (3)$$

где t_1 – время извлечения пленочного эталона – 1 мин; t_2 – время процесса настройки консоли щупа кругломера – 4 мин; t_3 – время подбора нужного градуса щупа – 6 мин; t_4 – время проведения операции «центрирование/выравнивание» – 4 мин.

После внедрения нового варианта проведения подготовительных операций время сократилось:

$$t_1' + t_2' + t_3' + t_4' = 8 \text{ мин}, \quad (4)$$

где t_1' – время извлечения пленочного эталона – 1 мин; t_2' – время процесса настройки консоли щупа кругломера – 2 мин; t_3' – время подбора нужного градуса щупа – 1 мин; t_4' – время проведения операции «центрирование/выравнивание» – 4 мин.

В кругломерах данного типа (с контактным датчиком) важным моментом при настройке является процесс центрирования/выравнивания, который является самой затратной по времени операцией при подготовке прибора к работе. И при этом, как описывалось выше, значение имеет высота нахождения щупа на детали, но, кроме этого, также большое значение имеет наклон щупа к детали.

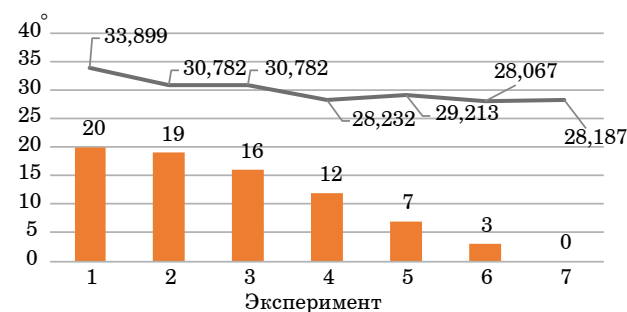
Далее был повторно проведен эксперимент, в результате которого операцию центрирования/выравнивания проводили несколько раз, при разных углах наклона щупа (интервал был взят из значений от 0 до 20°). Результаты приведены в табл. 3.

По итогам эксперимента был построен график (рис. 8).

Действительно, важно учитывать не только наклон стола при калибровке кругломера, но и множество сторонних факторов (рис. 9).

• *Таблица 3. Результаты эксперимента*
 • *Table 3. Experiment results*

Номер эксперимента	Угол наклона щупа, °	Значение центрирования, мкм
1	20	33,899
2	19	30,782
3	16	30,782
4	12	28,232
5	7	29,213
6	3	28,067
7	0	28,187



• *Рис. 8. Зависимость результата центрирования детали от угла поворота щупа, мкм*
 • *Fig. 8. Get the result of centering the part from the bottom of the wheel, mkm*



• Рис. 9. Дополнительные факторы, не учитываемые в стандартном процессе калибровки
 • Fig. 9. Additional factors not taken into account in the standard calibration process

Таким образом, экспериментальным методом были определены наилучшие положения угла наклона щупа кругломера – от 12 до 7°, значения ниже способны «увести» щуп в неконтролируемый предел; значения выше 12° выводят щуп очень близко к краю детали, что не дает возможности говорить об адекватности измерения круглости и concentричности [8].

Заключение

Калибровка кругломера сводится к процессу выравнивания стола и выявлению настройки усилия прикосновения щупа к детали. Однако в методике подчеркиваются идеальные условия содер-

жания лаборатории, чего, к сожалению, в реальных условиях производства сложно достичь (влажность, взвесь в воздухе, запыленность, вибрация, высокая температура). Помимо этого, очень много времени тратится на калибровку кругломера, при настройке функции центрирования/выравнивания стола, которая может удачно завершиться только через 30–40 мин, а это очень трудоемко. Следовательно, для более быстрого процесса калибровки, по нашему предположению, необходимо также учитывать диаметр детали, массу детали, высоту детали, марку стали, угол наклона щупа, влажность, температуру, уровень запыленности и вибрацию. Учет данных факторов и выведение их требуемых условий сделают процесс измерения более стабильным.

Проведенное исследование показало перспективность выполнения подобных оценок для оптимизации выполнения подготовительных операций для прибора контроля отклонений формы и взаимного расположения поверхностей деталей – кругломера. Определены оптимальные значения угла наклона щупа и относительных координат двух точек касания детали, при использовании которых можно будет проводить измерения на кругломере без ручного подбора угла, с возможностью выставлять щуп в двух определенных точках на детали для сканирования сечений во время операции «центрирование/выравнивание». Это повышает эффективность применения и сокращает время подготовки измерительного прибора к измерениям.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию методики измерений параметров деталей – тел вращения – на кругломере.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 17353-89. Кругломеры. Типы. Основные параметры. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1999. 8 с.
2. Гуцина Е. А., Ефремов Н. Ю., Епифанцев К. В. Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 104 с.
3. Епифанцев К. В. Измерение дефектов геометрии. Алгоритм формирования круглограммы ROUNDTEST RA-120P // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 10 (221). С. 48–51.
4. Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю. Исследование процесса калибровки и настройки датчиков кругломера ROUNDTEST RA-120P // Датчики и системы. 2022. № 5. С. 57–62.
5. Епифанцев К. В. Исследование алгоритма функционирования системы центрирования кругломера // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 2 (223). С. 150–156.
6. Захаров О. В., Бржозовский Б. М. О точности центрирования при измерении на кругломерах // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20–22.
7. Епифанцев К. В., Фролова Е. А., Ефремов Н. Ю. Проблемы калибровки кругломера ROUNDTEST RA-120P при подготовке к работе // За нами будущее: сб. тр. тезисов I Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, приуроченная к 180-летию ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. 2023. С. 219–221.

8. *Ефремов Н. Ю., Епифанцев К. В.* Исследование влияния угла наклона щупа и расположения точек касания на точность измерения кругломером ROUNDTEST RA-120P // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* 2023. № 6. С. 124–130.

REFERENCES

1. GOST 25142-82 (ST CMEA 1156-78). Round meters. Types. Basic parameters. Technical requirements. Moscow: Standards Publishing House; 1983. 28 p. (In Russ.).
2. Guschina E. A., Efremov N. Yu., Epifancev K. V. Digital metrology. Educational and methodical manual. SPb.: SUAI; 2022. 104 p. (In Russ.).
3. Epifancev K. V. Measurement of geometry defects. Algorithm for the formation of a round diagram ROUNDTEST RA-120P. *Electronics: Science, technology, business.* 2022;(10(221)):48–51. (In Russ.).
4. Epifancev K. V., Efremov N. Yu. Investigation of the calibration process of the calibration and adjustment of the sensors of the ROUNDTEST RA-120P meter. *Sensors and systems.* 2022;(5):57–62. (In Russ.).
5. Epifancev K. V. Investigation of the algorithm of functioning of the centering system of the round meter. *Electronics: Science, technology, business.* 2023;(2(223)):150–156. (In Russ.).
6. Zakharov O. V., Brzhozovsky B. M. On the accuracy of centering when measuring on round meters. *Measuring technique.* 2006;(11):20–22. (In Russ.).
7. Epifantsev K. V., Frolova E. A., Efremov N. Yu. Problems with calibration of the ROUNDTEST RA-120P roundness meter during preparation for work. The future is ours: Collection of abstracts from the I All-Russian scientific and practical conference of young scientists and specialists, dedicated to the 180th anniversary of VNIIM D. I. Mendeleev. 2023, pp. 219–221. (In Russ.).
8. Efremov N. Yu., Epifantsev K. V. Study of the influence of the angle of inclination of the probe and the location of touch points on the measurement accuracy of the ROUNDTEST RA-120P roundness meter. *Electronics: science, technology, business.* 2023;(6):124–130. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Область научных интересов – цифровая метрология, измерение дефектов формы, измерительные преобразователи, нормирование точности.

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

Research interests – digital metrology, measurement of defect forms, measurement transformations, value rationing.

Поступила в редакцию 11.06.2023

Поступила после рецензирования 23.06.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Received 11.06.2023

Revised 23.06.2023

Accepted 09.10.2023

Универсальный финитно-временной оптимальный метод фильтрации дискретных сигналов информационно-измерительных систем

Юрий Павлович Иванов¹

✉ ypi35@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9872-6544, SPIN-код: 2368-9628, author ID: 635463

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

Аннотация. Рассматриваются оптимальные финитно-временные без обратной и с обратной связью методы обработки в общем случае немарковских и негауссовских сигналов на фоне произвольных помех измерения, обеспечивающие универсальность применения и упрощение алгоритмов работы информационно-измерительных систем.

Ключевые слова: оптимальные финитно-временные методы фильтрации дискретных сигналов, произвольные модели сигналов и помех измерения, оценка качества алгоритмов обработки сигналов, математический аппарат на основе теорем ортогонального проецирования и Дуба

Для цитирования: Иванов Ю. П. Универсальный финитно-временной оптимальный метод фильтрации дискретных сигналов информационно-измерительных систем // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 11–17. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-11-17.

Original article

Universal finite-time optimal method of filtering discrete signals of information and measurement systems

Yuri P. Ivanov¹

✉ ypi35@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9872-6544, SPIN-code: 2368-9628, author ID: 635463

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

Abstract. The paper considers optimal finite-time methods without feedback and with feedback for processing, in general, non-Markov and non-Gaussian signals against the background of arbitrary measurement interference, providing versatility of application and simplification of algorithms for the operation of information and measurement systems.

Keywords: optimal finite-time methods of filtering discrete signals, arbitrary models of measurement signals and interference, evaluation of the quality of signal processing algorithms, mathematical apparatus based on orthogonal projection theorems and Doob

For citation: Ivanov Yu. P. Universal finite-time optimal method of filtering discrete signals of information and measurement systems. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):11–17. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-11-17.

Введение

В настоящее время на практике и в теории широко применяются классические методы оптимальной фильтрации измерительной информации, которые базируются на использовании марковских моделей полезных сигналов [1–5]. Основное достоинство данного подхода к обработке сигналов заключается в получении рекуррентных алгоритмов оценки и классификации измерительных сигналов. Это позволяет значительно сэкономить память устройств обработки в случае использования всей информации о сигнале с момента начала процесса измерения.

Но при этом не учитывается адекватность используемых моделей измерения реальным процессам. Все реальные сигналы измерения име-

ют гладкие реализации и являются многократно дифференцируемыми, в отличие от марковских моделей сигналов. При синтезе алгоритмов обработки информации не принимаются во внимание такие важные характеристики, как практические интервалы корреляции сигнала, реальные временные и частотные свойства устройств фильтрации и прогнозирования сигналов, взаимосвязь требований к точности, надежности и сложности используемых алгоритмов обработки сигналов [6].

В связи с этим возникают следующие основные недостатки используемой классической методологии оценки и классификации сигналов:

1) высокая сложность используемых оптимальных методов и алгоритмов оценки и принятия решений по наблюдаемой измерительной информации. Например, требование рекуррентной

обработки сигналов при использовании фильтрации Калмана, основанное на марковском свойстве полезного сигнала, приводит к необходимости представления модели сигналов в пространстве состояний, определения матриц состояния и возмущения и вычисления нелинейного уравнения Риккати, усложняющих алгоритм оценки сигналов [1, 7]. При определении фильтра Винера требуется осуществить операции факторизации и сепарации, а также использовать преобразование Хинчина по заданным корреляционным функциям [8];

2) отсутствие универсальности разработанных алгоритмов оптимальной обработки сигналов относительно вида моделей измерения и помех измерения. Например, алгоритмы Калмана в случае помехи в виде белого шума и в случае коррелированной помехи значительно отличаются [1]. Фильтры Винера в основном используются для скалярных стационарных моделей измерения [8];

3) низкая помехозащищенность и робастность алгоритмов Калмана из-за наличия в них обратной связи, которая может привести к неустойчивой работе алгоритма при изменении исходных данных в процессе работы и при накоплении ошибок вычислений [1];

4) алгоритмы нелинейной оптимальной фильтрации сигналов в связи с их сложностью при реализации в основном являются приближенными на основе разработанных методов линеаризации или гауссовой аппроксимации полученных алгоритмов оценки [3];

5) используемые в настоящее время комплексные алгоритмы, обеспечивающие астатизм оценок при обработке сигналов, не являются оптимальными и обладают значительным временем переходного процесса [9].

В связи с этим возникла необходимость в разработке новой методологии фильтрации сигналов измерения, не имеющей перечисленных выше недостатков.

В данной работе представлена идеология оптимальных финитно-временных линейных без обратной и с обратной связью методов фильтрации, интерполяции и прогноза сигналов в условиях полной априорной определенности, охватывающих широкий класс практических применений.

Финитно-временная без обратной связи линейная оптимальная и оптимально-инвариантная фильтрация дискретных сигналов измерения

Рассмотрим следующую линейную с аддитивной помехой модель измерения и алгоритм оп-

тимальной линейной оценки вектора полезного сигнала, определяемый соотношением (4) [10, 11]:

$$Y_i = X_i + H_i, i = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

$$\mathbf{X1}_i = [X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-r+1}]^T, r = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\mathbf{Y1}_i = [Y_i, Y_{i-1}, \dots, Y_{i-r+1}]^T, r = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{X1}}_i^* = \mathbf{A}_i^* \times \mathbf{Y1}_i + \hat{\mathbf{X}}_{\mathbf{H}}; \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T]\}^{-1}; \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{X1}}_i^* = \left[\hat{X}_i^*, \hat{X}_{i-1}^{**}, \dots, \hat{X}_{i-r+1}^{**} \right]^T; \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{\mathbf{H}} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}_i^*] \times \mathbf{M}[\mathbf{X1}_i]; \quad (7)$$

$$\mathbf{Apr}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i + k_{\text{pr}} \times \mathbf{Y1}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \times \mathbf{Y1}_i^T]\}^{-1}, k_{\text{pr}} = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$D\varepsilon_i^* = \{\mathbf{K}\mathbf{x1}_i - \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}_i^*\}_{1,1}; \quad (9)$$

$$D\varepsilon_{\text{пр}i} = \{\mathbf{K}\mathbf{x1}_i - \mathbf{A}_i^* \times \mathbf{K}\mathbf{x1}_i - \{\mathbf{A}_i^* \cdot \mathbf{K}\mathbf{x1}_i\}^T - \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}_i^*\}_{1,1}, \quad (10)$$

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}_i^* = \mathbf{A}_i^* \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T] \times \mathbf{A}_i^{*T}\}; \quad (11)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{x1}_i = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \times \mathbf{X1}_i^T], \quad (12)$$

где X_i, H_i – в общем случае произвольные случайные скалярные временные последовательно-сти, содержащие как флуктуационные, так и регулярного вида сигналы и помехи. Законы распределения сигнала и помехи произвольные. Предполагается, что сигнал X_i и помеха измерения H_i в любые моменты времени взаимно не коррелированы $\mathbf{K}[X_i, H_i] = 0$, математические ожидания сигнала $\mathbf{M}[X_i] \neq 0$ и помехи $\mathbf{M}[H_i] = 0$.

Корреляционные матрицы

$$\mathbf{K}\mathbf{x1}\mathbf{y1}_i = \mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T],$$

$$\mathbf{K}\mathbf{y1}_i = \mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T], \mathbf{K}\mathbf{x1}_i, \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}_i^*$$

и матричный оператор оптимальной оценки имеют размерности $r \times r$. Корреляционные матрицы $\mathbf{K}\mathbf{x1}_i$ и $\mathbf{K}[\mathbf{H}_i \times \mathbf{H}_i^T]$ могут быть известны, и в этом случае производится синтез в условиях полной априорной определенности, или если одна из них неизвестна или обе неизвестны при условии, что помеха H_i является белым шумом, синтез алгоритма может быть осуществлен в условиях параметрической априорной неопределенности. Наличие в обозначении оптимальных

оценок двух звездочек отражает тот факт, что эти оценки интерполированы полученными измерениями в текущий момент времени.

Соотношение (7) обеспечивает несмещенность оценок $\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^*$.

Линейный матричный оптимальный по критерию минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценок оператор \mathbf{A}_i^* определен на основании теоремы ортогонального проецирования [10]. Соотношения (9)–(12), соответственно, определяют в i -й момент времени дисперсии ошибок оценок фильтрации сигналов в случае оптимальной $D\varepsilon_i^*$ и произвольной $D\varepsilon_{pr_i}$ оценок и корреляционные матрицы оптимальных оценок сигнала $\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}_i^*$ и $\mathbf{K}\mathbf{x}\mathbf{1}_i$; векторного сигнала $\mathbf{X}\mathbf{1}_i$ [7].

Соотношение (8) определяет оптимальный прогноз оцениваемого сигнала на k_{pr} временных дискретов.

Линейный оптимальный алгоритм финитно-временной оптимальной оценки векторного сигнала $\mathbf{X}\mathbf{1}_i$ в i -й момент времени по результатам наблюдения векторного сигнала $\mathbf{Y}\mathbf{1}_i$, представленный соотношениями (1)–(11), обладает следующими свойствами:

1) оптимальный алгоритм финитно-временной оценки по критерию следа корреляционной матрицы ошибок оценок обеспечивает в i -й момент времени оптимальные, несмещенные оценки фильтрации $(\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^*)_1$ и оптимальные интерполяции $(\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^{**})_k, k = i-1, i-2, \dots, i-r+1$ сигнала $\mathbf{X}\mathbf{1}_i$;

2) инвариантность относительно таких свойств сигнала, как марковость, стационарность, флуктуационность и регулярность, а также коррелированность или некоррелированность помехи измерения;

3) более высокая устойчивость, робастность и помехозащищенность относительно фильтрации Калмана при использовании параметрически адаптивной и неадаптивной оценки из-за отсутствия обратной связи относительно оптимальной оценки;

4) финитно-временной алгоритм является значительно более простым при реализации, чем алгоритм Калмана, так как не требуется вычисления нелинейного уравнения Риккати для оценки качества оценки и коэффициента Калмана, а также нет необходимости представления оцениваемого процесса в пространстве состояний и определения матриц состояния и возмущения модели сигнала;

5) можно достичь быстрой асимптотической сходимости точности финитно-временной оценки к потенциальной точности фильтрации Калмана при увеличении параметра r в силу того, что практические интервалы корреляции оцениваемого сигнала и памяти устройства обработки ин-

формации, определяемой при использовании линейного оператора обработки характером изменения его весовой функции, являются конечными и малыми относительно времени наблюдения результатов измерений Y . При получении оптимальной текущей оценки сигнала используется вектор измерения $\mathbf{Y}\mathbf{1}_i$ на интервале времени $r \times d$, где d – интервал дискретизации;

6) этот алгоритм можно рассматривать как оптимально-инвариантный алгоритм при использовании комплексной двухкомпонентной оценки сигналов, если предполагать, что в i -й момент времени X_i является низкочастотной помехой измерения одного из измерителей, содержащей флуктуационную и регулярную нестационарную составляющие помехи, а H_i – высокочастотная помеха измерения другого измерителя. Данный комплексный алгоритм обеспечивает оптимальное снижение суммарных помех в оценке X_i , т. е. заменяет рациональную процедуру параметрического устранения регулярной помехи при использовании подхода на основе обеспечения астабильности заданного порядка на оптимальную.

Для использования комплексной оптимальной оценки при наличии дополнительных каналов информации о сигнале \mathbf{X}_i размерность векторного сигнала $r \mathbf{Y}\mathbf{1}_i$ увеличивается пропорционально числу используемых каналов информации.

К недостатку метода можно отнести то, что оценка оптимального финитно-временного без обратной связи алгоритма для широкого класса навигационных сигналов измерения уступает незначительно по точности фильтрации Калмана при использовании памяти уже при $r = 2-4$.

Финитно-временная с обратной связью линейная оптимальная и оптимально-инвариантная фильтрация дискретных сигналов измерения

Модель измерения определяется соотношением (1), свойства сигнала и помехи измерения и содержание обозначений в данном соотношении такие же, как и при финитно-временной фильтрации без обратной связи. Алгоритм оптимальной с обратной связью линейной оценки представлен уравнениями (13)–(18) [12]:

$$\mathbf{X}\mathbf{1}_i = [X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-r+1}]^T, \quad r = 1, \dots, n; \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i = [Y_i, \hat{X}\mathbf{o}_{i-1}^{**}, \dots, \hat{X}\mathbf{o}_{i-r+1}^{**}]^T, \quad r = 1, \dots, n; \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^* = \mathbf{A}\mathbf{o}_i^* \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i + \hat{\mathbf{X}}\mathbf{n}_i, \quad (15)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{o}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X}\mathbf{1}_i \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T]\}^{-1}, \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^* = \left[\hat{X}o_i^*, \hat{X}o_{i-1}^{**}, \dots, \hat{X}o_{i-r+1}^{**} \right]^T; \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{X}}\mathbf{x}_i = [\mathbf{I} - \mathbf{A}\mathbf{o}_i^*] \times \mathbf{M}[\mathbf{X}\mathbf{1}_i]; \quad (18)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{o}\mathbf{r}_i^* = \mathbf{K}[\mathbf{X}\mathbf{1}_{i+s_{pr}} \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T] \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T]\}^{-1}, k_{pr} = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

$$D\varepsilon o_i^* = \{\mathbf{K}\mathbf{x}\mathbf{1}_i - \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}\mathbf{o}_i^*\}_{1,1}; \quad (20)$$

$$D\varepsilon o_{pr_i} = \{\mathbf{K}\mathbf{x}\mathbf{1}_i - \mathbf{A}\mathbf{o}_i^* \times \mathbf{K}\mathbf{x}\mathbf{1}_i - \{\mathbf{A}\mathbf{o}_i^* \times \mathbf{K}\mathbf{x}\mathbf{1}_i\}^T - \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}\mathbf{o}_i^*\}_{1,1}; \quad (21)$$

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}\mathbf{o}_i^* = \mathbf{A}\mathbf{o}_i^* \times \{\mathbf{K}[\mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i \cdot \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T] \times \mathbf{A}\mathbf{o}_i^{*T}\}; \quad (22)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{x}\mathbf{1}_i = \mathbf{K}[\mathbf{X}\mathbf{1}_i \times \mathbf{X}\mathbf{1}_i^T]. \quad (23)$$

Корреляционные матрицы

$$\mathbf{A}\mathbf{o}_i^*, \mathbf{K}[\mathbf{X}\mathbf{1}_i \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T], \{\mathbf{K}[\mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i \times \mathbf{Y}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^T]\}, \mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}\mathbf{o}_i^*$$

имеют размерности $r \times r$.

Линейный матричный оптимальный по критерию минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценок оператор $\mathbf{A}\mathbf{o}_i^*$ (16) определен на основании теоремы ортогонального проецирования [8] и с учетом оптимального прогнозирования оцениваемого сигнала и помехи измерения. Соотношения (20)–(22), соответственно, определяют в i -й момент времени дисперсии ошибок оценок фильтрации с обратной связью сигналов в случае оптимальной $D\varepsilon o_i^*$ и $D\varepsilon o_{pr_i}$ произвольной оценок и корреляционную матрицу оптимальных оценок сигнала $\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{o}\mathbf{o}_i^*$ [8].

Линейный алгоритм финитно-временной оптимальной оценки $\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}\mathbf{o}_i^*$ с обратной связью векторного сигнала $\mathbf{X}\mathbf{1}_i$ в i -й момент времени, представленный соотношениями (13)–(23), обладает следующими достоинствами:

1) алгоритму фильтрации с обратной связью свойственны, в основном, те же достоинства, что и алгоритму финитно-временной оценки без обратной связи;

2) рассматриваемый алгоритм не уступает по устойчивости и по многим параметрам робастности и помехоустойчивости алгоритму Калмана;

3) по точности полученных оценок марковских сигналов оптимальный алгоритм с обратной связью совпадает с соответствующим алгоритмом Калмана, и одновременно алгоритм является оптимальным относительно любого произвольного вида сигналов;

4) легко осуществляется оптимальное прогнозирование сигналов на $k = 1, 2, \dots$ дискретов при использовании соотношения (19).

К недостатку метода можно отнести то, что при отсутствии знания о наличии свойства марковости и его порядка оцениваемого сигнала выбор параметра r , определяющего память алгоритма, осуществляется по показателю качества алгоритма оценки, т. е. по дисперсии ошибки оптимальной оценки.

Пример сравнения фильтрации Калмана и финитно-временной с обратной связью

Модель измерения определяется соотношением (1) со свойствами, определенными выше. Оцениваемый сигнал $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ – стационарный скалярный временной ряд, корреляционная функция которого определяется следующим соотношением:

$$K(\tau) = \sigma_x^2 \cdot \exp\{-\alpha|\tau|\} \cdot (\cos\beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin\beta|\tau|),$$

где среднеквадратическое значение сигнала и временные параметры корреляционной функции имеют следующие значения:

$$\sigma_x = 3; \alpha = 0,01 \frac{1}{c}; \beta = 0,01 \frac{1}{c}.$$

Помеха измерения $H_i, i = 1, 2, \dots, n$ является белым дискретным шумом, корреляционную функцию которого можно представить соотношением $KH_{i,j} = \sigma_h^2 \delta_{i,j}$, где среднеквадратическое значение помехи $\sigma_h = 3$; $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера. В результате применения оптимальной финитно-временных рекуррентного метода с обратной связью и скользящего без обратной связи оптимального алгоритмов оценок при значениях памяти $r = 3$ и интервала дискретизации, в соответствии с теоремой Котельникова, $d = 4$ и фильтрации Калмана, были получены следующие результаты.

1. Статистические, полученные по выборке объемом $N = 2000$, и теоретические оценки дисперсий ошибок оценок, соответственно, равны для оптимальной финитно-временной без обратной связи $Dwef_N = 1,87$; $D\varepsilon_{pr,60c} = 1,853$; $D\varepsilon_{opt,60c} = 1,853$; для оптимальной финитно-временной с обратной связью $Dwef00_N = 1,109$; $D\varepsilon_{pr,60c} = 1,258$; $D\varepsilon_{opt,60c} = 1,258$, для фильтрации Калмана статистическая оценка равна $Dwefk_N = 1,102$, и теоретическая оценка равна $D\varepsilon_k^* = 1,151$.

2. Интервалы времен переходных процессов у трех видов фильтрации примерно равны 250 с.

При определении в данном примере стационарной оптимальной матрицы (16) $\mathbf{A}\mathbf{o}$ финитно-временной оценки с использованием обратной связи были использованы следующие представления для определяющих ее матрицы размерностей $r \times r$:

$$\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \times \mathbf{Y1}_i^T] = \begin{bmatrix} \sigma_y^2 & \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,i-2}^* & \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,i-3}^* \\ \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,i-2}^* & K1o_{i-2,i-2}^* & K1o_{i-2,i-3}^* \\ \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,i-3}^* & K1o_{i-2,i-3}^* & K1o_{i-3,i-3}^* \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \times \mathbf{Y1}_i^T] = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,i-2}^* & \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,i-3}^* \\ KX1_{i,i-1} & K1o_{i-2,i-2}^* & K1o_{i-2,i-3}^* \\ KX1_{i,i-2} & K1o_{i-2,i-3}^* & K1o_{i-3,i-3}^* \end{bmatrix},$$

где $\sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_h^2$ – дисперсия наблюдаемого сигнала $Y_i, i=1,2,\dots,n$; $KX1_{i,j}, i, j = i-1, i-2, \dots, i-r+1$ – корреляционные моменты оцениваемого сигнала X_i ; $K1o_{k,j}^*, k, j = i-1, i-2, \dots, i-r+1$ – корреляционные моменты оптимальных оценок сигнала $X_j; j = i-1, i-2, \dots, i-r+1$; $\rho_{i,i-1} = \frac{KX1_{i,i-1}}{\sigma_x^2}$ – коэффициент, определяющий оптимальные прогнозы сигнала и его оценок $K1o_{k,l}^*, k, j = i-1, i-2, \dots, i-r+1$ на интервале дискрета d .

Определение матриц $\mathbf{K}[\mathbf{X1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T], \{\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T]\}$ размерностей $r \times r$ для нахождения оптимального оператора \mathbf{A}^* финитно-временной оценки без использования обратной связи не представляет трудностей. Как видно из приведенных результатов моделирования, оптимальная финитно-временная оценка с использованием обратной связи по точности и по времени переходного процесса совпадает с оценкой фильтрации Калмана, но значительно проще при реализации алгоритмов оценки и является более универсальной относительно моделей сигналов и помех измерения.

Для реализации оптимальных алгоритмов финитно-временной фильтрации при наличии коррелированной помехи измерения в случае алгоритма без обратной связи необходимо только учесть в корреляционной матрице $\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \cdot \mathbf{Y1}_i^T]$ результатов измерения наличие корреляционных связей компонент корреляционной матрицы помехи измерения $\mathbf{K}[\mathbf{H1}_i \cdot \mathbf{H1}_i^T]$, а в случае оптимальной финитно-временной фильтрации с обратной связью представить матрицу $\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \times \mathbf{Y1}_i^T]$, входящую в оператор оптимальной фильтрации \mathbf{A}_o^* , на основании теоремы ортогонального проектирования в следующем виде:

$$\mathbf{K}[\mathbf{Y1}_i \times \mathbf{Y1}_i^T] =$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_y^2 & \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,2}^* + \rho h_{i,i-1} \cdot K\varepsilon_{i-1,1}^* & \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,3}^* + \rho h_{i,i-1} \cdot K\varepsilon_{i-1,2}^* \\ \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,2}^* + \rho h_{i,i-1} \cdot K\varepsilon_{i-1,1}^* & K1o_{i-2,2}^* & \\ \rho_{i,i-1} \cdot K1o_{i-1,3}^* + \rho h_{i,i-1} \cdot K\varepsilon_{i-1,2}^* & K1o_{i-2,i-3}^* & K1o_{i-3,3}^* \end{bmatrix},$$

где $K\varepsilon_{i-1,k}^*, k, i = i-1, i-2, \dots, i-r+1$ – элементы корреляционной матрицы размерности $r \times r$ ошибок оптимальных оценок на $i-1$ шаге оптимальных оценок; $\rho h_{i,i-1} = \frac{KH1_{i,i-1}}{\sigma_h^2}$ – коэффициент, определяющий оптимальный прогноз помехи измерения на интервале дискрета d .

Заключение

В работе предложена финитно-временная методология оптимальной фильтрации дискретных сигналов информационно-измерительной системы, обладающая универсальностью относительно моделей измерения и расширяющая область применения способов фильтрации сигналов, простотой реализации алгоритмов фильтрации сигналов и не уступающая по качеству обработки информации классическим методам обработки сигналов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 495 с.
2. ван Трис Н. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1: Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. М.: Сов. радио, 1972. 744 с.
3. Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Сов. радио, 1978. 320 с.
4. Тихонов В. Т., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.
5. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1973. 440 с.
6. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
7. Иванов Ю. П., Бирюков Б. Л. Информационно-статистическая теория измерений модели сигналов и анализ точности систем: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2008. 160 с.
8. Иванов Ю. П., Никитин В. Г. Информационно-статистическая теория измерений. Методы оптимального синтеза информационно-измерительных сигналов, критерии оптимизации и свойства оценок: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2011. 100 с.
9. Иванов Ю. П., Сinyaков А. Н., Филатов И. В. Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.
10. Иванов Ю. П. Фinitно-временной метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. 2018. № 5. С. 23–28.
11. Иванов Ю. П. Комплексный метод адаптивной оптимальной фильтрации произвольных дискретных сигналов в условиях флуктуационных и регулярных помех измерения // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 2. С. 20–26.
12. Иванов Ю. П. Фinitно-временной и спектрально-фinitный методы оптимальной фильтрации дискретных сигналов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1, № 3. С. 140–147.

REFERENCES

1. Sage E., Mels J. Theory of evaluation and its application in communication and control. Moscow: Svyaz; 1976. 495 p. (In Russ.).
2. van Tris G. Theory of detection, evaluation and modulation. Vol. 1: Theory of detection, estimates and linear modulation. Moscow: Soviet radio; 1972. 744 p. (In Russ.).
3. Sosulin Yu. G. Theory of detection and evaluation of stochastic signals. Moscow: Soviet radio; 1978. 320 p. (In Russ.).
4. Tikhonov V. T., Kharisov V. N. Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow: Radio and communications; 2004. 608 p. (In Russ.).
5. Medich J. Statistically optimal linear estimates and control. Moscow: Energiya; 1973. 440 p. (In Russ.).
6. Franks L. Signal theory. Moscow: Sovetskoe radio; 1974. 344 p. (In Russ.).
7. Ivanov Yu. P., Biryukov B. L. Information and statistical theory of measurement of signal models and analysis of the accuracy of systems: study guide. SPb.: SUAI; 2008. 160 p. (In Russ.).
8. Ivanov Yu. P., Nikitin V. G. Information and statistical theory of measurements. Methods of optimal synthesis of information and measurement signals, optimization criteria and evaluation properties: educational. SPb.: SUAI; 2001. 100 p. (In Russ.).
9. Ivanov Yu. P., Sinyakov A. N., Filatov I. V. Integration of information and measuring devices of aircraft. Leningrad: Mechanical engineering; 1984. 207 p. (In Russ.).
10. Ivanov Yu. P. Finite-time method of optimal filtering of discrete signals. Devices and systems: management, control, diagnostics. 2018;(5):23–28. (In Russ.).
11. Ivanov Yu. P. A complex method for adaptive optimal filtering of arbitrary discrete signals under conditions of fluctuating and regular measurement noise. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2022;1(2):20–26. (In Russ.).
12. Ivanov Yu. P. Finite-time and spectral-finite methods of optimal filtering of discrete signals. Marine Intelligent technologies. 2021;1(3):140–147. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Иванов Юрий Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – обработка навигационных сигналов информационно-измерительных систем, автор финитно-временной и спектрально-финитной методологии оптимальной фильтрации сигналов и оценок достоверностей принимаемых решений о недостижении случайных процессов допустимых значений на заданном интервале времени, используемых в процессах контроля состояний приборных комплексов и при оценке безопасности полета летательных аппаратов.

Поступила в редакцию 11.09.2023

Поступила после рецензирования 22.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Ivanov Yuri P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – processing of navigation signals of information and measurement systems, author at the finite-time and spectral-finite methodology of optimal filtering of signals and estimates of the reliability of decisions made about not achieving random processes of acceptable values at a given time interval, used in the processes of monitoring the states of instrument complexes and in assessing the flight safety of aircraft.

Received 11.09.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 09.10.2023

Разработка структуры вероятностной модели для многономенклатурного производства

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. Описывается процесс разработки структуры вероятностной модели для многономенклатурного производства. Предлагается использовать вероятностные модели для определения оптимальной структуры производства. Вероятностные модели основаны на вероятностных методах и позволяют учесть различные факторы и неопределенности, которые могут возникнуть в процессе производства и которые могут быть переменными в зависимости от особенностей организации.

Таким образом, статья имеет практическое значение для предприятий, занимающихся многономенклатурным производством, и может быть использована для разработки оптимальной структуры производства на основе вероятностных моделей.

Ключевые слова: вероятностные модели, многономенклатурное производство, хронометраж операций, переналадочные процессы, процессы приработки

Для цитирования: Винниченко А. В. Разработка структуры вероятностной модели для многономенклатурного производства // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 18–22. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-18-22.

Original article

Development of a probabilistic model structure for multi-nomenclature production

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 paper describes the process of developing the structure of a probabilistic model for multi-nomenclature production. It is proposed to use probabilistic models to determine the optimal structure of production. Probabilistic models are based on probabilistic methods and allow considering various factors and uncertainties that may arise in the production process and which may be variable depending on the characteristics of the organization.

Thus, this article is of practical importance for enterprises engaged in multi-nomenclature production and can be used to develop an optimal production structure based on probabilistic models.

Keywords: probabilistic models, multi-nomenclature production, timing of operations, changeover processes, run-in processes

For citation: Vinnichenko A. V. Development of a probabilistic model structure for multi-nomenclature production. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(5):18–22. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-18-22.

Введение

Разработка вероятностной модели для многономенклатурного производства с организацией переналадки оборудования является актуальной задачей в современном промышленном производстве, поскольку такая организация работы требует частой переналадки оборудования, что может приводить к потерям времени и неэффективному использованию ресурсов.

Структура вероятностной модели включает в себя описание вероятностей и длительности различных событий в процессе переналадки, а также определение эффективности производства при различных сценариях. Это позволяет принять обо-

снованные решения по оптимизации переналадки и достижению максимальной производительности.

Вероятностная модель позволяет рационализировать процесс переналадки оборудования, учитывая статистическую информацию о времени и затратах на переналадку, основываясь на принципе случайности, учитывая возможные вариации в процессе производства и переналадки.

Материал и методы исследования

Вероятностная модель работы многономенклатурной производственной системы с организацией

переналадки должна начинаться с определения множества типов номенклатур продукции, которые могут быть произведены в системе, а также определения вероятностей появления заказов на каждый тип номенклатуры продукции [1].

Для расчета вероятностей появления заказов на каждый тип номенклатуры продукции можно использовать данные о предыдущих заказах или другие статистические данные.

Общее число заказов за отчетный период будет составлять сумму всех типов изделий и их количество (1):

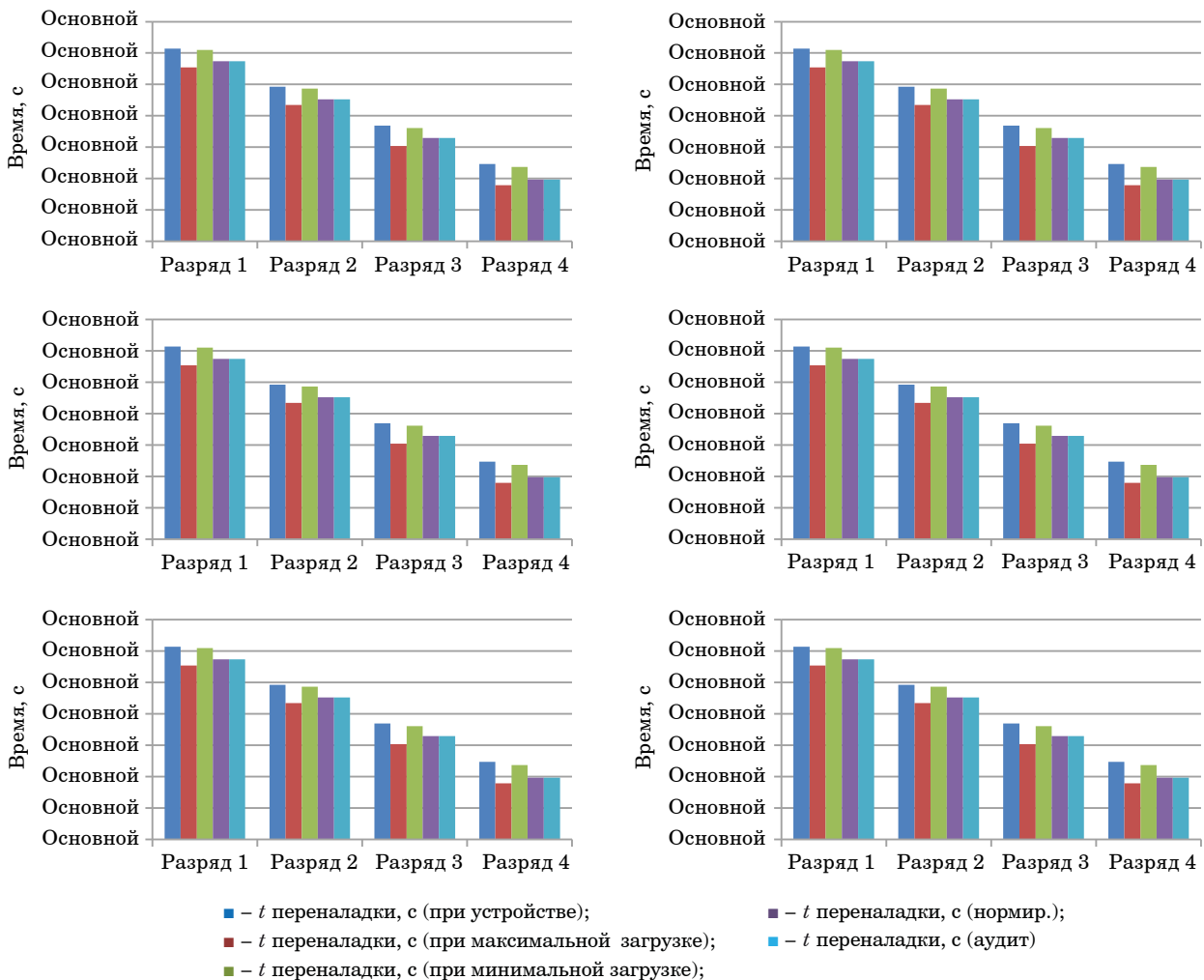
$$\sum ABC, \dots n = A + B + C, \dots, +n, \quad (1)$$

где A – количество продукции типа «А»; B – количество продукции типа «В»; C – количество продукции типа «С»; n – число типов продукции.

Таким образом, можно получить вероятности появления заказов на каждый тип номенклатуры продукции.

Проводя расчеты хронометража переналадки оборудования для многономенклатурного производства, необходимо определить временные характеристики процесса переналадки для каждого типа номенклатуры продукции, учитывающие следующие факторы: время, необходимое для перенастройки каждого оборудования, время на разборку и сборку оборудования, замену инструментов, настройку параметров и т. д. Также необходимо учитывать продолжительность переходного процесса и требуемое время для стабилизации процесса после переналадки, а именно – время приработки; количество оборудования, которое требуется перенастраивать для производства разных номенклатур. Возможно, будут необходимы дополнительные настройки и проверки производственной линии перед началом производства новой номенклатуры [2].

Были исследованы процессы переналадки по трем типам изделий среди операторов с разным квалификационным разрядом (рис. 1).



• Рис. 1. Хронометраж переналадки в многономенклатурном производстве
 • Fig. 1. Timing of changeover in multi-nomenclature production

Также учтены временные затраты на приработку технологической линии (рис. 2, где использованы обозначения, как на рис. 1).

Исследовав хронометраж процессов переналадки и процессов приработки, можно сделать вывод о том, что трудовые операции, связанные с изделием типа «С», более длительные, а также видно влияние опыта оператора на скорость выполнения производственных работ [3, 4].

Получив вероятностные данные по всем видам номенклатур производства и проведя хронометраж, далее необходимо идентифицировать факторы, влияющие на процесс многономенклатурного производства. Затем определяются отношения между переменными в модели и определяются ограничения.

Для построения математической модели многономенклатурного производства с учетом переналадки оборудования и вероятностных переменных определены следующие параметры и переменные, которые при необходимости можно дополнять, в зависимости от особенностей производства [5].

1. Параметры (2):

$$\langle n, m, T, R_i, D_i, P_i, t_i, t_j, C_i \rangle, \quad (2)$$

где n – число типов продукции; m – число производственных циклов; T – длительность производственного цикла, с; $R_i = \{R_1, \dots, R_n\}$ – длительность переналадки оборудования для каждого типа продукции, с; $D_i = \{D_1, \dots, D_n\}$ – длительность приработки оборудования для каждого типа продукции, с; $P_i = \{P_1, \dots, P_n\}$ – вероятность

появления каждого типа продукции; $t_i = \{t_1, \dots, t_n\}$ – время выполнения операции для каждого типа продукции, с; $t_j = \{t_1, \dots, t_m\}$ – время выполнения операции для каждого производственного цикла, с; $C_i = \{C_1, \dots, C_n\}$ – стоимость переналадки оборудования для каждого типа продукции.

2. Переменные (3):

$$\langle X_{ij}, C_i, C_j \rangle, \quad (3)$$

где $X_{ij} = \{X_1, \dots, X_i; X_1, \dots, X_j\}$ – количество продукции типа i , произведенной за производственный цикл j ; $C_i = \{C_1, \dots, C_n\}$ – стоимость производства продукции типа i ; $C_j = \{C_1, \dots, C_m\}$ – общая стоимость производства за производственный цикл j .

3. Ограничения (4)–(8):

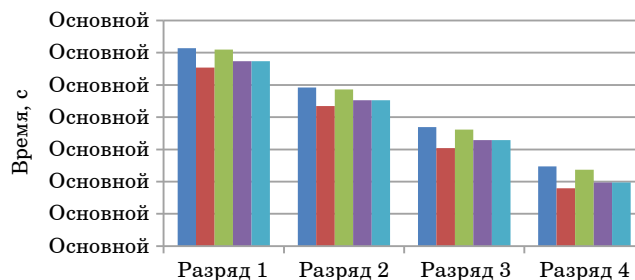
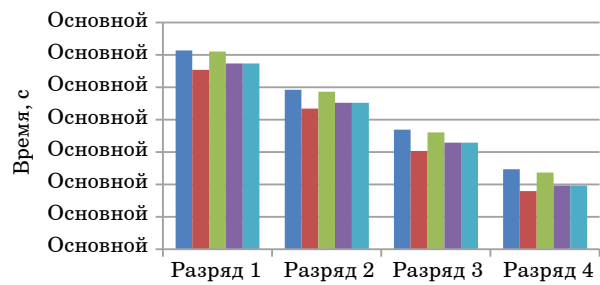
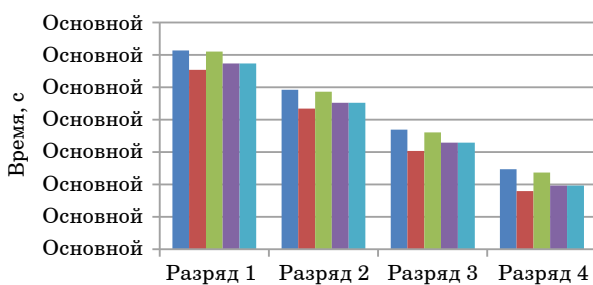
$$C_j = \sum_{i=1}^n C_i X_{ij} \quad (4)$$

– общая стоимость производства за производственный цикл j равна сумме стоимостей производства каждого типа продукции;

$$\sum_{i=1}^n (t_{ij} \sum_{j=1}^m X_{ij}) \leq T \quad (5)$$

– общее количество времени, потраченного на производство каждого типа продукции; не должно превышать длительность производственного цикла;

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = P_i \quad (6)$$



• Рис. 2. Хронометраж приработки в многономенклатурном производстве
 • Fig. 2. Timing of runing-in in multi-nomenclature production

– сумма произведенной продукции каждого типа за все производственные циклы, должна быть равна вероятности появления данного типа продукции;

$$P_i \leq T \quad (7)$$

– время переналадки оборудования для каждого типа продукции, не должно превышать длительность производственного цикла;

$$D_i \leq T \quad (8)$$

– время приработки оборудования для каждого типа продукции, не должно превышать длительность переналадки.

4. Целевая функция (9):

$$C_j = \sum_{j=1}^m C_i X_{ij} \rightarrow \min \quad (9)$$

– минимизация общей стоимости производства за все производственные циклы.

Результаты исследования

В разработанной структуре были учтены основные элементы математической модели для описания многономенклатурного производства с учетом переналадки оборудования и вероят-

ностных переменных. Данная модель может быть дополнена и оптимизирована в соответствии с конкретными условиями и требованиями производства.

Вероятностная модель для многономенклатурного производства с организацией переналадки оборудования позволяет учесть возможные вариации и неопределенности в процессе производства и принять решения на основе вероятностной оценки рисков и возможностей. Это помогает оптимизировать процесс производства и улучшить эффективность работы предприятия.

Заключение

Внедрение вероятностной модели для многономенклатурного производства с организацией переналадки оборудования может значительно повысить эффективность работы предприятия. Она позволяет минимизировать время простоя оборудования, усовершенствовать планирование производства, снизить затраты на переналадку и повысить производительность.

Важно отметить, что вероятностная модель является динамической и требует постоянного мониторинга и анализа данных, чтобы быть актуальной и надежной. Но при правильной разработке и использовании она может стать эффективным инструментом оперативного планирования управления производством.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Исаков И. Н.* Особенности оперативного планирования в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства, оснащенного многофункциональным оборудованием // Известия ТулГУ. Техн. науки. 2017. № 8–2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-operativnogo-planirovaniya-v-usloviyah-melkoseriynogo-mnogonomenklaturного-proizvodstva-osnaschennogo> (дата обращения: 15.09.2023).
2. *Винниченко А. В.* Исследование численных характеристик при номенклатурном производстве с итеративными процессами переналадки производственного оборудования // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXV Междунар. науч. конф. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2022. С. 156–162.
3. *Винниченко А. В., Назаревич С. А.* Предиктивный анализ пиковых численных характеристик при переналадке групповых технологических процессов синхронизированного производства // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. III Всерос. науч. конф. СПб.: ГУАП, 2022. С. 129–133.
4. *Винниченко А. В., Назаревич С. А.* Исследование учета продолжительности трудовых операций и оценка технико-экономических показателей технологического процесса // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Тезисы докл. V Междунар. форума. СПб.: ГУАП, 2023. С. 211–213.
5. *Митин С. Г., Бочкарёв П. Ю., Бокова Л. Г.* Разработка технологических операций с учетом показателя технологичности в системе планирования многономенклатурных технологических процессов // Вестн. СГТУ. 2011. № 2 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologicheskikh-operatsiy-s-uchyotom-pokazatelya-tehnologichnosti-v-sisteme-planirovaniya-mnogonomenklaturnyh> (дата обращения: 15.09.2023).

REFERENCES

1. Isakov I. N. Features of operational planning in conditions of small-scale multi-nomenclature production equipped with multifunctional equipment. News of TULSU. Technical sciences. 2017;(8-2). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-operativnogo-planirovaniya-v-usloviyah-melkoseriynogo-mnogonomenklaturnogo-proizvodstva-osnaschennogo> [Accessed 15 September 2023].
2. Vinnichenko A. V. Investigation of numerical characteristics in nomenclature production with iterative processes of readjustment of production equipment. Wave electronics and infocommunication systems: Proceedings of the XXV International scientific conference. Part 1. SPb.: SUAI; 2022, pp. 156–162. (In Russ.).
3. Vinnichenko A. V., Nazarevich S. A. Predictive analysis of peak numerical characteristics during the readjustment of group technological processes of synchronized production. Modeling and situational quality management of complex systems: Collection of reports of the III All-Russian scientific conference. SPb.: SUAI; 2022, pp. 129–133. (In Russ.).
4. Vinnichenko A. V., Nazarevich S. A. Study of accounting for the duration of labor operations and assessment of technical and economic indicators of the technological process. Metrological support of innovative technologies: Abstracts of the dokl. V International. forum. SPb.: SUAI; 2023, pp. 211–213. (In Russ.).
5. Mitin S. G., Bochkarev P. Yu., Bokova L. G. Development of technological operations taking into account the index of manufacturability in the planning system of multi-nomenclature technological processes. Vestnik SSTU. 2011;(2(58)). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologicheskikh-operatsiy-s-uchyotom-pokazatelya-tehnologichnosti-v-sisteme-planirovaniya-mnogonomenklaturnyh> [Accessed 15 September 2023].

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 15.09.2023

Поступила после рецензирования 22.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

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 15.09.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 09.10.2023

Научная статья
УДК 658.562.3

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-23-26

Оценка результативности потока создания ценности

Муаамар Мохсен Салех Ахмед Мабхеш¹

moammer1993@gmail.com, orcid.org/0009-0004-4141-4397, SPIN-код: 4140-9242

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. Рассмотрены проблемы оценки результативности потока создания ценности на производстве. Предлагаются комплексная модель оценки, ее интерпретация и последующее возможное развитие, основанное на комбинации методов SERQUAL, освоенного объема и метода анализа иерархий.

Ключевые слова: поток создания ценности, освоенный объем, SERQUAL

Для цитирования: Мабхеш М., Тушавин В. А. Оценка результативности потока создания ценности // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 23–26. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-23-26.

Original article

Evaluating the performance of the value creation stream

Muhammad Mabhash¹

moammer1993@gmail.com, orcid.org/0009-0004-4141-4397, SPIN-code: 4140-9242

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. The article deals with the problems of evaluating the performance of the value creation flow in manufacturing. A complex model of evaluation, its interpretation and its further possible development based on the combination of SERQUAL, mastered volume and hierarchy analysis methods are proposed.

Keywords: value stream, earned value, SERQUAL

For citation: Mabhash M., Tushavin V. A. Evaluating the performance of the value creation stream. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(5):23–26. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-23-26.

В соответствии с общей практикой, под потоком создания ценности (ПСЦ) понимают все действия, как создающие, так и не создающие ценность, которые позволяют продукции пройти все процессы от разработки концепции до запуска в производство и от принятия заказа до доставки потребителю. «ПСЦ» используется как интегральное понятие, включающее в себя материальные потоки (сырья, материалов, комплектующих, деталей и сборочных единиц, готовой продукции), информационные и финансовые потоки, направленные на создание и доставку готовой продукции потребителю в установленное время, в установленном месте, с установленной стоимостью, с последующим ее обслуживанием в процессе эксплуатации и утилизации [1, 2].

ПСЦ состоит из процессов. Каждый процесс можно описать в виде кортежа вида:

$$\langle a_i, b_i, c_i, X_i, Y_i, Z_i, V_i \rangle,$$

где a_i – время, создающее потребительскую ценность; b_i – время, не создающее ценности, но необходимое для функционирования (например, время, необходимое для переналадки оборудования); c_i – время, не создающее потребительской ценности (простой); а также соответствующие им векторы X , Y и Z нормативных затрат, состоящие из постоянной f и переменной части v , что можно записать в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} x_f & y_f & z_f \\ x_v & y_v & z_v \end{bmatrix}_i,$$

где $i = \overline{1, n}$; n – число оптимизируемых процессов.

Пусть ${}^i_t V$ – матрица создаваемых процессом ценностей для времени t :

$${}^i_t V = {}^i_t(v_{ik}).$$

Отсюда имеем следующую модель требований для времени t и $t+k$ (до и после корректирующих действий):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_{i=1}^n \text{tr} \left(\begin{bmatrix} x_f & y_f & z_f \\ x_v & y_v & z_v \end{bmatrix}_i \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a_i & b_i & c_i \end{bmatrix}^T \right) \right)_{t+k} \leq \\ \left(\sum_{i=1}^n \text{tr} \left(\begin{bmatrix} x_f & y_f & z_f \\ x_v & y_v & z_v \end{bmatrix}_i \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a_i & b_i & c_i \end{bmatrix}^T \right) \right)_t \\ \sum_{i=1}^n \sum_{t+k}^i V = \sum_i \sum_j \sum_k^i (v_{jk}) \geq \sum_{i=1}^n \sum_t^i V \end{array} \right. .$$

Из модели следует, что возможны следующие варианты:

1) оба члена системы обращаются в равенство, в таком случае можно говорить об обеспечении качества продукции;

2) только первый член системы обращается в равенство, в таком случае наблюдается улучшение качества продукции;

3) только второй член системы обращается в равенство, в таком случае наблюдается повышение эффективности предприятия;

4) оба члена обращаются в неравенство, в таком случае наблюдается повышение результативности предприятия [3].

Следует отметить, что предложенная методика рассматривает только финансовый аспект создания ценности в парадигме бережливого производства, однако содержательный аспект остается за рамками мониторинга и контроля. Для устранения этой лакуны предлагается использовать метод GAP-анализа из метода SERVQUAL. Этот метод получил свое наименование от сокращения двух английских слов: «serv» (от англ. «service» – «сервис») и «qual» (от англ. «quality» – «качество»). Он был разработан А. Парасураманом, В. А. Зейтгамлом и Л. Л. Берри [4] в 80-е гг. XX в. путем эмпирических исследований, проведенных авторами с помощью анализа опросов фокус-групп на основе разработанной ими модели расхождения (GAP-модель).

SERVQUAL – одна из моделей, которая является частным случаем статистического анализа диффузных байесовских моделей. Парасураман, Зейтгамл и Берри ввели в научный оборот термин «разрыв» («гар»), означающий разницу между ожидаемым и фактическим качеством обслуживания. Выявление и измерение «разрывов», по мнению авторов, позволит четко определять сильные и слабые места сервисов, а также перевести в конкретные цифры понятия «лучше» и «хуже».

Модель SERVQUAL-анкетирования состоит из двух этапов: на первом этапе определяют, как должна выглядеть идеальная система с точки зрения потребителя – «ожидание» (E), а второй этап – как система выглядит фактически с точки зрения потребителя – «восприятие» (P).

Основой, кратко отражающей суть концепции, является алгоритм «Ожидание минус восприятие» («Expectation – perception», E – P):

$$SQ = E - P,$$

где показатель P – «восприятие»; показатель E – «ожидание»; SQ – уровень сервиса компании, или величина разрыва GAP.

Поскольку качество – это степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям (п. 3.6.2 ГОСТ Р ИСО 9000-2015), то в данном случае под требованиями можно рассматривать «ожидание» от ПСЦ, а под присущими характеристиками – «восприятие», в таком случае SQ и определяет качество ПСЦ. Как правило, и «ожидание», и «восприятие» будут носить комплексный характер и представлять собой совокупность единичных показателей качества.

Решение задачи построения неизвестной функции качества на основе единичных показателей является одной из наиболее сложных со времен зарождения квалиметрии. Если задачи, связанные с выявлением закономерностей выходных параметров процесса от входных, основаны на хорошо разработанных математических методах, то задача построения функции отражения точки в многомерном пространстве на конечном отрезке имеет множество нюансов и не может быть в принципе решена окончательно. В данном случае одной из целей построения функции комплексного показателя качества является сравнение верифицируемого значения с некоторым эталоном, в качестве которого может выступать как другой вектор единичных показателей, так и вектор номинальных значений единичных показателей. Наиболее распространенными методами в данном случае будут классические подходы, основанные на свертках с помощью взвешенных средних по Колмогорову [5] или нечеткой логике [6]. Ранее было предложено возможное решение этой задачи на основе метода стохастического доминирования при линейной свертке показателей с использованием элементов робастного проектирования для нормализации шкал [7] или метода стохастического доминирования применительно к нелинейным функциям свертки комплексного показателя качества [8]. Однако в данном случае также возможно использование метода анализа иерархий для определения весовых коэффици-

ентов с их последующей линейной сверткой, поскольку результирующая величина служит лишь индикатором отклонения от целевого значения и предполагается к использованию в качестве индикатора качества осуществления процессов, входящих в ПСЦ. Введение дополнительного параметра (помимо имеющихся идеальных (ожидаемых) показателей, выступающих отчасти в качестве «голоса потребителя» (VOC), и планируемых (воспринимаемых), являющихся отчасти «голосом процесса» (VOP)), а именно – фактических показателей в данный момент, позволит модернизировать метод освоенного объема для мониторинга и контроля ПСЦ в части соблюдения не только сроков и бюджета, но и степени достижения целей данного процесса.

Метод освоенного объема (англ. «Earned Value Management», EVM) – ряд методов, объединенных под общим названием, использующихся для измерения и контроля эффективности выполнения проектов. Метод основан на использовании ряда числовых показателей, рассчитываемых по ходу реализации проекта, и позволяет оценить ожидаемые совокупные затраты по его завершении.

Помимо используемых в методе показателей AC (Actual Cost), PV (Planned Value) и EV (Earned Value), введем следующие параметры:

- EQV (Expectation Quality Value) – ожидаемый показатель качества;
- PQV (Perception Quality Value) – воспринимаемый показатель качества;
- AQV (Actual Quality Value) – фактический уровень на момент контроля.

На основе перечисленных показателей определяются отклонения (по аналогии с EVM):

$GAP(C) = EQV - PQV$ – комплексная GAP-модель качества;

$GAP(E) = EQV - AQV$ – текущее отклонение от требований;

$GAP(P) = PQV - AQV$ – текущее отклонение от плановых характеристик.

Также можно рассчитать относительные величины:

$IDX(C) = EQV/PQV$ – индекс соответствия характеристик требованиям;

$IDX(E) = EQV/AQV$ – индекс соответствия требованиям для ПСЦ;

$IDX(P) = PQV/AQV$ – индекс соответствия характеристикам для ПСЦ.

Введенные выше величины позволят осуществлять оперативный мониторинг и контроль ПСЦ и могут быть использованы, в том числе, в цифровом двойнике предприятия, что позволит оценить его эффективность и результативность.

Глобальная конкуренция и растущие требования клиентов заставляют предприятия повышать свою эффективность и результативность как при производстве, так и на стадии разработки продукта. Предложенная в статье модернизация процесса картирования ПСЦ позволит решить ряд задач комплексного развития производства товаров и услуг на базе современных методов управления и контроля деятельности предприятий и организаций на основе принципа сквозного интегрированного управления качеством и требований международных стандартов ИСО серии 9000, 14000 и положений Всеобщего управления качеством (TQM).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rother M., Shook J. Learning to see – value-stream mapping to create value and eliminate muda, lean enterprise institute. Cambridge, 2003.
2. Мабхеш М., Тушавин В. А. Проблемы моделирования потока создания ценности наукоемкого производства // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 4 (130). С. 170–174.
3. Мабхеш М., Тушавин В. А. Картирование потока создания ценности в процессе разработки продукта в производственных системах // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 9 (135). С. 45–50.
4. Parasuraman A., Zeithaml V. A., Berry L. L. A conceptual model of service quality and its implications for future research // Journal of marketing. 1985. Vol. 49, № 3. P. 41–50.
5. Варжапетян А. Г. Квалиметрия: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 2005. 176 с.
6. Милова В. М., Семенова Е. Г., Добряков А. А. Особенности применения теории нечетких множеств в задачах управления сложными системами // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 2. С. 156.
7. Тушавин В. А. Робастный подход к оценке комплексного показателя качества ИТ-услуг // Системы управления и информационные технологии. 2014. № 4 (58). С. 92–95.
8. Тушавин В. А. Управление качеством ИТ-процессов производственного предприятия: монография. М.: Научные технологии, 2015. 249 с.

REFERENCES

1. Rother M., Shook J. Learning to see – value-stream mapping to create value and eliminate muda, lean enterprise institute. Cambridge, 2003.
2. Mabhesh M., Tushavin V. A. Problems of modeling the flow of value creation in knowledge-intensive industries. Science and business: ways of development. 2022;(4(130)):170–174. (In Russ.).
3. Mabhesh M., Tushavin V. A. Value stream mapping in manufacturing systems product development. Science and Business: ways of development. 2022;(9(1135)):45–50. (In Russ.).
4. Parasuraman A., Zeithaml V. A., Berry L. L. A conceptual model of service quality and its implications for future research. Journal of marketing. 1985;49(3):41–50.
5. Varzhapetyan A. G. Qualmetrics: textbook. SPb.: SUAI; 2005. 176 p. (In Russ.).
6. Milova V. M., Semenova E. G., Dobryakov A. A. Peculiarities of application of the theory of fuzzy sets in control problems of complex systems. Questions of radio electronics. 2010;(2):156. (In Russ.).
7. Tushavin V. A. Robust approach to assessing a comprehensive IT service quality indicator. Automation and remote control. 2014;(4(58)):92–95. (In Russ.).
8. Tushavin V. A. Quality management of IT processes of a manufacturing enterprise: a monograph. Moscow: Scientific technology; 2015. 249 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мабхеш Муаамар Мохсен Салех Ахмед, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством процессов создания ценности наукоемкого производства.

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 25.09.2023

Поступила после рецензирования 30.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Mabhash Muaamar, Postgraduate Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management of value creation processes of knowledge-intensive production.

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 value creation processes of knowledge-intensive production.

Received 25.09.2023

Revised 30.09.2023

Accepted 09.10.2023

Исследование влияния климатических факторов на процесс филаментизации при прототипировании аддитивных изделий

Станислав Анатольевич Назаревич¹

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

Анастасия Вячеславовна Свириденко¹

an.sviridenko29@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2979-5235, SPIN-код: 8876-3830

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

Аннотация. Описаны результаты исследования по выявлению влияния пиковых изменений температуры и влажности в лабораторном или производственном пространстве на процесс филаментизации при прототипировании аддитивных изделий в рамках замкнутого цикла реверсивного инжиниринга изделий. В целях повышения качества процесса филаментизации при прототипировании аддитивных изделий в лабораторном или производственном пространстве выдвинуты гипотезы о влиянии внешних температурных факторов на процесс 3D-печати и результирующее качество создаваемых путем реверсивного инжиниринга изделий. Допусковые параметры исходного изделия являются эталон-образцом для аддитивного изделия, поэтому оценка факторов влияния микроклимата в лабораторном или производственном пространстве на протекание процесса послойного синтеза является актуальной задачей. По результатам исследования предложен субоптимальный климатический режим для лаборатории или производственного пространства, обеспечивающий малодефектное протекание процесса прототипирования.

Ключевые слова: аддитивное производство, филаментизация PLA-пластика, 3D-технологии, FFF-устройства, климатические режимы

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: Назаревич С. А., Свириденко А. В. Исследование влияния климатических факторов на процесс филаментизации при прототипировании аддитивных изделий // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 27–31. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-27-31.

Original article

Study of the influence of climatic factors on the filamentization process during prototyping of additive products

Stanislav A. Nazarevich¹

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

Anastasiya V. Sviridenko¹

an.sviridenko29@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2979-5235, SPIN-code: 8876-3830

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

Abstract. The article describes the results of a study to identify the influence of peak changes in temperature and humidity in a laboratory or production space on the process of filamentization during prototyping of additive products within a closed cycle of reverse engineering of products. In order to improve the quality of the filamentization process when prototyping additive products in a laboratory or production space, hypotheses have been put forward about the influence of external temperature factors on the 3D-printing process and the resulting quality of products created through reverse engineering. The tolerance parameters of the initial product are the reference standard for the additive product, therefore, assessing the influence of the microclimate in a laboratory or production space on the course of the layer-by-layer synthesis process is an urgent task. Based on the results of the study, a suboptimal climate regime for a laboratory or production space was proposed, ensuring a low-defect prototyping process.

Keywords: additive manufacturing, filamentization of PLA plastic, 3D-technologies, FFF-device, climatic regimes

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: Nazarevich S. A., Sviridenko A. V. Study of the influence of climatic factors on the filamentization process during prototyping of additive products. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):27–31. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-27-31.

Введение

Аддитивные технологии включают в себя множество технологий послойного синтеза с использованием таких материалов, как металл, керамика, бумага, пластик. Одним из самых быстро развивающихся способов 3D-печати является технология на основе экструзии с использованием разных видов пластиков. Несмотря на то, что номенклатура видов используемого для печати пластика с каждым годом расширяется, качество производимых изделий все еще не удовлетворяет требованиям для массового использования технологии в производственных операциях. Основная причина повышенной дефектности заключается во влиянии температурных режимов на процесс прототипирования [1–3].

Используемые при печати виды пластика имеют диапазон рабочих температур, в среднем равный 50 °С, при зависимости оптимальной температуры от типа пластика, цвета прутка и модели используемого принтера. Помимо этого, на процесс печати также могут оказывать влияние климатические условия в лабораторном или производственном помещении, что может стать причиной появления таких дефектов, как слабая связанность элементов детали друг с другом, наплавление лишнего материала на поверхности изделия, деформация углов детали, искривление поверхности детали, плохое качество поверхности на линии соприкосновения с опорой.

Исследование микроклиматических режимов

Несоответствие микроклиматических режимов лабораторного или производственного помещения необходимым условиям для протекания послойного синтеза с использованием PLA-пластика негативно влияет как на протекание самого процесса, так и на его результат. Результатом негативного влияния несоответствия температурным режимам является возникающая дефектность аддитивных изделий. В целях минимизации дефектов, формируемых под влиянием внешних климатических факторов, необходимо утвердить субоптимальные климатические режимы лабораторных или производственных помещений.

Данные об исследовании воздействия климатических факторов на процесс филаментизации пластика при прототипировании позволяют выявить более широкий спектр внешних факторов, влияющих на появление дефектов в процессе печати [4–7]. В отличие от приведенного в инструк-

ции к FFF-устройству диапазона рабочих температур принтера (15–32 °С), данный метод учитывает не только внешние климатические факторы, но и внутренние – температуру камеры, бесконтрольность которой приведет к формированию дефектов в изделии.

Исследование проводили в лабораторном помещении, площадь которого составляет 21 м². Начальные климатические условия соответствуют требованиям ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», согласно которому влажность воздуха должна составлять 40–60 %, а температура воздуха рабочей зоны лежит в диапазоне от 18 до 23 °С. При проведении исследования был использован PLA-пластик при печати на 3D-принтере Picaso 3D Designer PRO 250, поддерживающем FFF-технологии, особенность которой заключается в нагреве сопел и рабочего стола без обогрева камеры. Принтер располагался в помещении на расстоянии 4,5 м от окна и 2,5 м от входной двери.

Гипотеза 1: изменение условий печати, таких как проветривание помещения и положение крышки камеры, будет существенно влиять на процесс филаментизации PLA-пластика.

В ходе исследования проводили измерение температуры воздуха с помощью термометра в разных точках пространства рабочего помещения:

- всего помещения;
- у окна;
- у входной двери;
- на корпусе принтера;
- в камере принтера в процессе печати.

Кроме того, повторные измерения показателей проводили в условиях проветривания помещения при температуре внешней среды 5 °С (табл. 1).

Согласно результатам измерений, изменение климатических параметров лабораторного помещения провоцирует изменение температуры в камере принтера в пределах 1–2 °С, что не является значительным отклонением, способным вызвать появление дефекта.

Гипотеза о том, что изменение микроклимата лабораторного помещения существенно влияет на протекание процесса прототипирования, а именно – на филаментизацию PLA-пластика [7–10], и тем самым вызывает возникновение дефектов, отклоняется.

Гипотеза 2: при значениях температуры в диапазоне от 18 до 20 °С будут наблюдаться нарушения процесса филаментизации.

В процессе печати температура рабочего стола и сопла непостоянна: регистрируются изменения в пределах (± 2) °С. Это обусловлено положением

• Таблица 1. Фрагмент протокола исследования влияния изменения условий печати на температурные параметры

• Table 1. Fragment of a protocol for studying the effect of changing printing conditions on temperature parameters

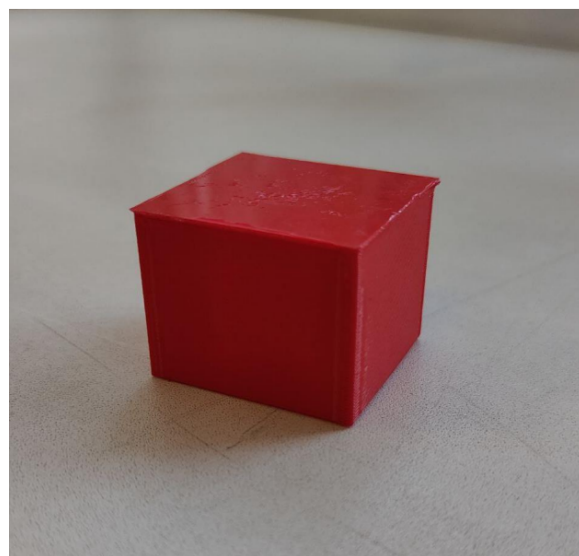
Условие	Температура, °С				
	средняя в помещении	у входной двери	у окна	на корпусе	в камере принтера
При закрытой крышке принтера без проветривания помещения	23	22	21	25	32
При открытой крышке принтера без проветривания помещения					30
При закрытой крышке принтера при проветривании помещения	22	21	16	23	31
При открытой крышке принтера при проветривании помещения					30

экструдера относительно рабочего стола в разные моменты печати, а также наличием второго вспомогательного сопла, которое играет роль теплоотвода. Для проведения испытаний определены комбинации температур стола, сопла и лабораторного помещения в рамках зарегистрированного температурного отклонения каждого параметра. Для комбинации проведен эксперимент и определены отклонения размеров полученного изделия от начальной геометрии (табл. 2).

• Таблица 2. Фрагмент протокола исследования зависимости среднего отклонения от заданной геометрии от температуры лабораторного помещения

• Table 2. Fragment of the protocol for studying the dependence of the average deviation from a given geometry on the temperature of a laboratory room

рабочего стола	Температура, °С		Среднее отклонение от заданной геометрии, мм
	сопла	лабораторного помещения	
104	250	18	0,51
104	249	19	0,39
104	251	20	0,28
107	250	19	0,37
107	249	20	0,21
107	251	18	0,38
106	250	20	0,34
106	249	18	0,42
106	251	19	0,40



- Экспериментальная модель
- Experimental model

Для проведения геометрических измерений были напечатаны кубики размером 2×2 см (рисунок).

Из полученных экспериментальных данных следует, что наибольшее отклонение размеров экспериментальной модели от начальной геометрии наблюдается при температуре лабораторного помещения 18 °С и заданных температурах рабочего стола и сопла 104 и 250 °С соответственно. С увеличением температуры функциональных частей 3D-принтера при неизменной температуре помещения – 18 °С – значение отклонения уменьшается, что объясняется компенсаторным влиянием нагрева рабочего стола и сопла принтера. Можно заметить, что значение температуры лабораторного помещения обратно пропорционально среднему отклонению от начальной геометрии.

Заключение

В результате исследования было выявлено, что при температурах лабораторного или производственного помещения, в котором происходит процесс прототипирования с использованием FFF-устройства, в пределах 22–23 °С не происходит существенного влияния на процесс филаментизации. Но при понижении температуры помещения до 18–20 °С наблюдаются отклонения размеров экспериментальной модели от начальной геометрии конструкции, что является нежелательным.

Таким образом, температура лабораторного или производственного помещения в диапазоне

22–23°C является субоптимальным температурным режимом, который обеспечивает малодефектное протекание процесса послойного синтеза с использованием PLA-пластика и FFF-устройства.

По результатам выполненного исследования сформирована таблица с температурными па-

раметрами рабочего стола, сопла 3D-принтера, возможными температурными режимами помещения и результатом процесса филаментизации, данные которой позволят прогнозировать возникновение дефектов и отклонение размеров полученного изделия от целевых геометрических параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белов П. С., Махов С. Л. Анализ дефектов изделий, получаемых методами аддитивных технологий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 1 (91). С. 8–13.
2. Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адмирала С. О. Макарова. 2017. № 4 (44). С. 765–776.
3. Шеметов Л. И., Распопина В. Б., Чернышков А. С. Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре // Вестн. ИрГТУ. 2022. № 3 (164). С. 386–399.
4. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA / В. А. Ермакова, Е. В. Гасперович, А. И. Ермаков, В. В. Литвяк // Наука и техника. 2022. № 2. С. 107–113.
5. Колесников А. А. Ситуационное управление обеспечением качества изготовления изделий по аддитивной технологии // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 4 (21). С. 84–92.
6. Зленко М. Л., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.
7. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) / С. В. Кондрашов, А. А. Пыхтин, С. А. Ларионов, А. Е. Сорокин // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49.
8. Чабаненко А. В. Метрологическое обеспечение изделий аддитивного производства // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. ст. V Междунар. форума / под ред. В. В. Окрепилова. СПб.: ГУАП, 2023. С. 151–152.
9. Чабаненко А. В. Модель подачи полимера в процессе послойного синтеза // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сб. ст. XXVI Междунар. науч. конф.: сб. ст.: в 3 ч. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2023. С. 198–202.
10. Назаревич С. А., Свириденко А. В. Исследование температурных режимов филаментизации PLA-пластика при прототипировании // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 51–55. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-51-55.

REFERENCES

1. Belov P. S., Mahov S. L. Analysis of defective products, we get urgentem methods additivn urgentem technology. Science and business: putty developments. 2019;(1(91)):8–13. (In Russ.).
2. Petrov V. M., Bezpachuk S. N., Yakovlev S. P. On the influence of structure on the strength of plastic products obtained by 3D printing. Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the sea and river fleet. 2017;(4(44)):765–776. (In Russ.).
3. Shemetov L. I., Raspopina V. B., Chernyshkov A. S. Transformation of sample geometry for mechanical testing of structural materials in FDM structure. Bulletin of ISTU. 2022;(3(164)):386–399. (In Russ.).
4. Ermakova V. A., Kasperovich E. V., Ermakov A. I., Litvyak V. V. Investigation of strength characteristics of products obtained by 3D printing from PLA. Science and technology. 2022;(2):107–113. (In Russ.).
5. Kolesnikov A. A. Situational management of ensuring the quality of manufacturing products using additive technology. Educational resources and technologies. 2017;(4(21)):84–92. (In Russ.).
6. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. N. (2013) Additive technologies in mechanical engineering. SPb.: Publishing house of Polytechnical University; 2013. 222 p. (In Russ.).
7. Kondrashov S. V., Pykhtin A. A., Larionov S. A., Sorokin A. E. The influence of technological modes of FDM printing and the composition of materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review). Proceedings of VIAM. 2019;(10(82)):34–49. (In Russ.).

8. 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.: SUAI; 2023, pp. 151–152. (In Russ.).
9. Chabanenko A. V. Model of polymer supply in the process of layer-by-layer synthesis. Wave electronics and infocommunication systems. Collection of articles XXVI International scientific conference: in 3 parts. P. 3. SPb.: SUAI; 2023, pp. 198–202. (In Russ.).
10. Nazarevich S. A., Sviridenko A. V. Research of temperature regimes of filamentation of PLA plastic during prototyping. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(4):51–55. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-51-55.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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.

Свириденко Анастасия Вячеславовна, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством процесса послойного синтеза и изделий аддитивного производства.

Поступила в редакцию 14.09.2023

Поступила после рецензирования 22.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

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.

Sviridenko Anastasiya V., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality control of the layer-by-layer synthesis process and additive manufacturing products.

Received 14.09.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 09.10.2023

Формирование архитектуры системы Интернета вещей

Андрей Петрович Мастеров¹

✉ elmaster55387@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4140-8638, SPIN-код: 8741-0524

Василий Евгеньевич Белай¹

belvasevg@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-5598-5164, SPIN-код: 2404-3976

Арина Вячеславовна Выграновская¹

arinavygranovskaya@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-9890-5278, SPIN-код: 3419-0000

Сергей Валентинович Солёный¹

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

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

Аннотация. Рассмотрены некоторые архитектуры Интернета вещей из известных источников, сформированы критерии к стандартизированному представлению системы Интернета вещей. Построена модель Интернета вещей с применением теории автоматического управления с учетом требований представления способов взаимодействия всех элементов структуры.

Ключевые слова: информационные технологии, Интернет вещей, информационные системы, система автоматического управления, информационная безопасность, IoT-A

Для цитирования: Мастеров А. П., Белай В. Е., Выграновская А. В., Солёный С. В. Формирование архитектуры системы Интернета вещей // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 32-42. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-32-42.

Original article

Forming the architecture of the Internet of things system

Andrei P. Masterov¹

✉ elmaster55387@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4140-8638, SPIN-code: 8741-0524

Vasily E. Belay¹

belvasevg@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-5598-5164, SPIN-code: 2404-3976

Arina V. Vygranovskaya¹

arinavygranovskaya@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-9890-5278, SPIN-code: 3419-0000

Sergey V. Solyonyj¹

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

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

Abstract. The article considers some architectures of the Internet of things from well-known sources, forms criteria for a standardized representation of the IoT system. A model of the Internet of things has been built using the theory of automatic control, taking into account the requirements for representing the ways of interaction of all elements of the structure.

Keywords: information technology, Internet of things, information systems, automatic control system, information security, IoT-A

For citation: Masterov A. P., Belay V. E., Vygranovskaya A. V., Solyonyj S. V. Forming the architecture of the Internet of things system. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):32–42. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-32-42.

Введение

Система Интернета вещей (IoT) затрагивает несколько больших сфер, однако ранее не было представлено стандартизированной архитектуры для ее проектирования, что позволило бы объединить различные технологии IoT в единую сетевую архитектуру. Причина тому – отсутствие попыток представить IoT с помощью

теории управления. Однако IoT невозможно проектировать, не обратившись к теории автоматического управления, а точнее, к системам автоматического управления. Что касается работы с данными, то присутствует разделение на подсистемы, на различных уровнях архитектуры IoT. Необходимо определить обобщенную архитектуру системы Интернета вещей без учета декомпозиции процессов на различных

уровнях для упрощенного представления, обратившись к теории автоматического управления (ТАУ).

Для мобильной робототехники при внедрении IoT обработчик данных с датчиков остается в робототехническом комплексе (РТК), для этого используется микроконтроллер, который выполняет роль передатчика на удаленный сервер, после вычисленные значения поступают обратно на микроконтроллер, и РТК выполняет цикл. Если в качестве РТК выступает массивная закрепленная конструкция, то IoT может использоваться для отслеживания логистики, циклов работы и данных с возможностью управления рабочими органами (объекты регулирования). Однако задержки различных видов сетей дают свои задержки передачи данных, снижая пропускную способность, дальность сигнала и удобство использования.

Систему для промышленной робототехники называют IIoT (Industrial Internet of Things). Она является более требовательной к производительности, сбору данных, безопасности системы, задержкам передачи данных и времени безотказной работы [1]. Для промышленного Интернета вещей характерно его использование только на промышленных предприятиях. Все большее внедрение промышленного Интернета вещей на предприятиях способствует развитию технологий Четвертой промышленной революции. При наступлении Четвертой промышленной революции, благодаря Интернету вещей, все предприятия станут полностью автоматизированы, способны работать без вмешательства человека долгое время.

Общие сведения об Интернете вещей

Интернет вещей – это технология, которая представляет множество различных «вещей», подключенных к сети Интернет, которые так образуют соединения с другими «вещами». «Вещами» в системах Интернета вещей называют приложения IoT, подключенные к Интернету устройства, либо промышленные машины и другие устройства. Важным условием для включения той или иной «вещи» в систему Интернета вещей является подключение ее к Интернету. Эти «вещи» используются для сбора данных, либо, если они являются какими-нибудь исполнительными механизмами, автоматизировано выполняют различные процессы.

Подключенные к IoT устройства и техника (управляемые механизмы) используются для автоматизации процессов в жизни человека, что

позволяет обезопасить жизнь и повысить скорость и качество его работы. В качестве примеров применения Интернета вещей можно назвать множество систем – от «умного» дома с автоматическим регулированием отопления и освещения до «умной» фабрики, которая контролирует промышленные роботы для поиска проблем, а затем автоматически перенастраивается для избегания сбоев.

Архитектура систем IoT, IIoT

Интернет вещей – это новый этап развития Интернета, где в настоящее время подключено больше неодушевленных объектов, чем людей. Когда в 2008–2009 гг. число устройств, подключенных к сети, превысило численность людей, населяющих планету, произошла трансформация цифрового пространства [2].

IoT относят, в первую очередь, к процессу развития Интернета потому, что он объединяет окружающие нас устройства в компьютерную сеть – Интернет. Эти устройства способны обмениваться информацией друг с другом и работать с минимальным вмешательством человека в режиме реального времени.

На рис. 1 показана общая схема системы IoT, отражающая большие группы технологий системы.

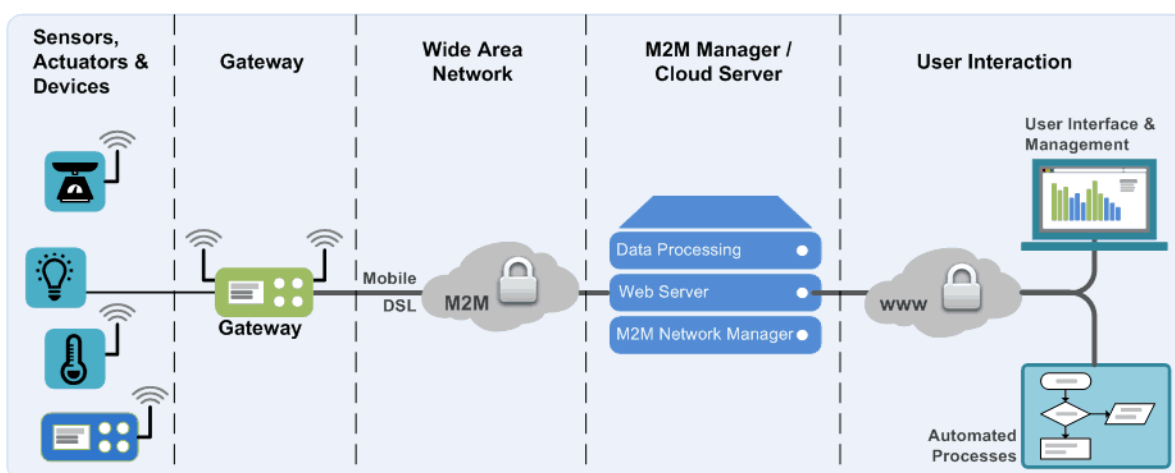
Другая же структурная схема (архитектура) системы Интернета вещей в виде слоев и уровней показана на рис. 2. Она состоит из 12 уровней, от физического до уровня аналитики данных.

Интернет вещей содержит несколько фактических размещений: непосредственно на периферийных устройствах (Edge) и в центре обработки данных, называемом «Backend», который представляет собой сервер, выполняющий операции с поступающими процессами [3].

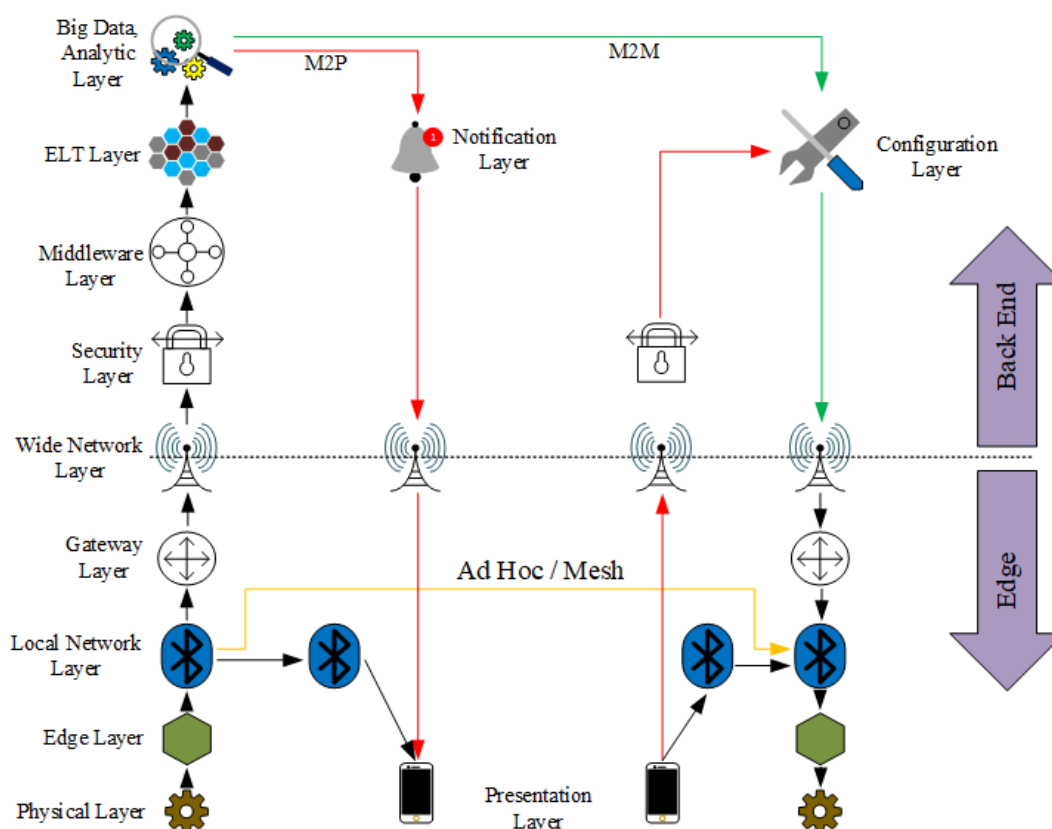
Данная схема Интернета вещей наиболее точно отражает все протекающие процессы. В ТАУ эту систему можно классифицировать как автоматическую замкнутую в немодифицированном представлении [4]. Процессы движения данных по системе начинаются в таком случае в слое Edge на уровне Physical. Проходя через Интернет до серверов (облака, где протекает Big Data), данные разделяются на два пути: первый обратно отсылает данные на уровень Physical, а второй путь идет к уровню Presentation.

Физический уровень (Physical Layer)

На этом уровне выделяются два различных вида операций: получение показаний датчиков и выполнение работ с рабочими органами РТК.



• *Рис. 1. Обобщенная схема сети IoT*
 • *Fig. 1. Generalized IoT network diagram*

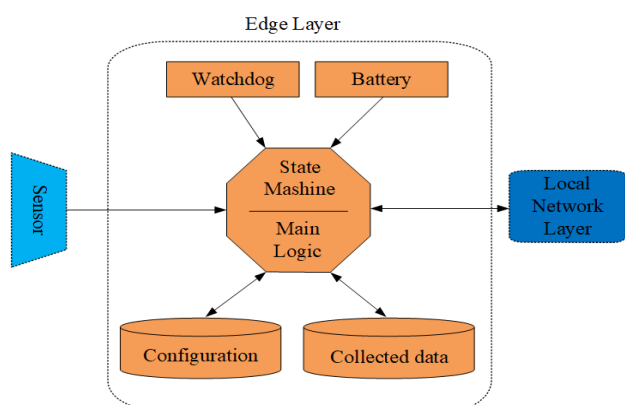


• *Рис. 2. Структурная схема IoT-системы*
 • *Fig. 2. Block diagram of the IoT-system*

Данный уровень определяет два типа операций – считывание показаний с датчиков и осуществление механической работы рабочими органами робототехнического комплекса (РТК). Датчики бывают различных видов, но при проектировании системы IoT устройство данного уровня является подсистемой со своими процессами.

Уровень периферийного вычисления (Edge Layer)

Данный уровень используется для преобразования информации с датчиков от аналогового вида к цифровому, либо от цифрового к аналоговому. Зачастую к одному датчику или исполнительному органу подключено одно устройство –



• Рис. 3. Блок-схема периферийного устройства
 • Fig. 3. Peripheral device block diagram

аналого-цифровой преобразователь (АЦП), либо цифроаналоговый преобразователь (ЦАП).

Рассматривая работу периферийных устройств на уровне процессов, можно сказать об объединении трех уровней – физического, периферийного вычисления и коммуникационного.

Локальная ETL используется для предоставления всех возможностей уровня – извлечения (Extract), преобразования (Transformation) и загрузки (Load). ETL обеспечивает получение, обработку и хранение информации с датчиков; помимо того, данный уровень ответственен за приведение этой информации к стандартизированному виду, фильтрацию от помех и некоторые первичные операции над данными.

Блок-схема уровня периферии IoT-системы показана на рис. 3.

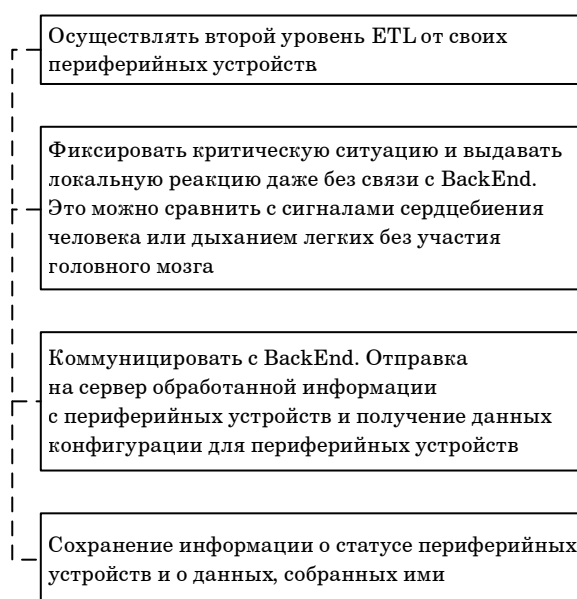
Уровень периферийной коммуникации (Local Network Layer)

Самой энергоемкой частью всей системы Интернета вещей, несомненно, является процесс передачи данных. Это связано с тем, что в большинстве своем периферийные устройства не подключены к питанию от сети и используют беспроводные средства связи. Также в некоторых системах периферийные устройства могут располагаться довольно далеко от шлюза, но количество передаваемой информации зачастую невелико. Для коммуникации с сетью на данном уровне применяют следующие протоколы:

- 1) ZigBee или Zwave;
- 2) BLE;
- 3) LoRa;
- 4) Proprietary low band (приоритетная нижняя полоса частот).

Уровень шлюза (Gateway Layer)

Основные функции, которые должен обеспечивать шлюз, показаны на рис. 4.



• Рис. 4. Основной функционал шлюза
 • Fig. 4. The main functionality of the gateway

Уровень шлюза в IoT может применяться по нескольким причинам (рис. 5).

Возможности AI (от англ. «Artificial Intelligence»; искусственный интеллект, ИИ) и ML (от англ. «Machine Learning»; машинное обучение, МО) иногда могут потребоваться на уровне шлюза. Для питания устройства шлюза обычно используется встроенная батарея или блок питания, хотя бывают случаи, когда необходимо низкое энергопотребление. Решением данной проблемы является переход работы устройства в более медленный режим работы системы передачи данных, т. е. устройствам занижается частота запросов на прием и отправку данных.

Уровень внешней связи (Wide Network Layer)

Слой внешней связи разделяет Backend и периферийные компоненты, составляющие системную архитектуру. Хотя иногда и используется проводной доступ в Интернет, шлюз обычно подключается к «серверной части» через мобильную беспроводную связь 4G или 5G.

Уровень логической связи, также известный как протокол LwM2M, используется для доступа к каждому периферийному устройству в сети. Тем не менее большинство поставщиков периферийных устройств не включают интерфейс LwM2M в производимую продукцию. Однако шлюзовое устройство может выступать в качестве оболочки для подключения, тем самым устраняя данную проблему.

В роли протокола шифрования в интерфейсе LwM2M выступает DTLS, который предлагает метод соединения «точка – точка» и отвечает за



- *Рис. 5. Возможные причины применения уровня шлюза*
- *Fig. 5. Possible reasons for using the gateway layer*

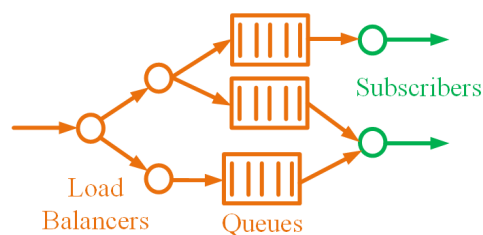
обработку ключей безопасности и сеанс создания соединения. Тот же ключ Backend, что использовался во время сеанса подключения, применяется для расшифровки пакетов данных, защищенных DTLS. Это создает некоторые проблемы для балансировщика нагрузки (Load Balancer), который необходим для автоматического масштабирования при высоких нагрузках передачи данных в системе. Для обхода большинства таких ограничений в качестве балансировщика нагрузки используют DNS, где каждому запросу соответствует новый IP-адрес.

Уровень безопасности (Security Layer)

Уровень безопасности служит для обеспечения аутентификации, авторизации и учета. Процессы шифрования и дешифрования данных, отправляемых через Интернет, также включены в этот уровень. Хотя каждый облачный сервер имеет уникальный протокол безопасности, все они имеют одинаковую структуру с точки зрения функциональности (принципа распределения ролей и разрешений). Security Layer, кроме того, выполняет функцию терминатора в зашифрованных DTLS-соединениях.

Уровень внутрисетевой связи (Middleware Layer)

Данный уровень служит для обеспечения внутренней функциональности того же балансировщика нагрузки, но для очередей сообщений и потоков передачи данных верхних уровней системы. Слой построен преимущественно с использованием микросервисов облачных провайдеров, потому как располагается в Backend-слое,



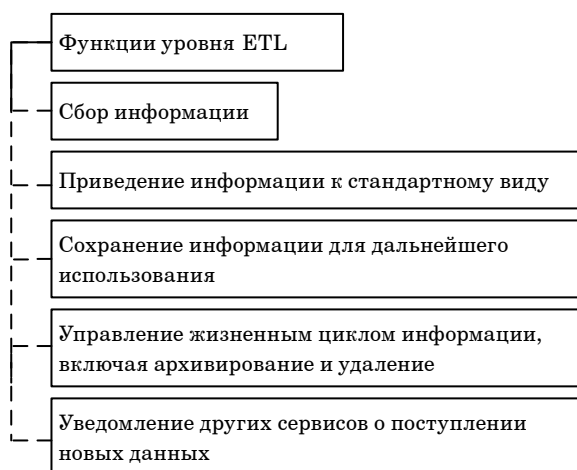
- *Рис. 6. Блок-схема паттернов внутрисерверной связи*
- *Fig. 6. Flowchart of intra-server communication patterns*

т. е. участвует в процессах на облачных серверах. Задачей таких микросервисов является обеспечение асинхронной передачи пакетов данных с использованием буферизации и функцией перераспределения нагрузки.

На рис. 6 показана блок-схема паттернов внутрисерверной связи. Здесь Load Balancer распределяет нагрузку между разными внутренними сервисами. При распределении данных на различные сервисы создаются очереди (Queue) на обработчиках запросов, они обеспечивают промежуточную буферизацию запросов для возможности реализовать асинхронную работу множества последовательных сервисов. После трансформации в асинхронную передачу данных эти данные направляются к получателям (Subscribers), которые настроены под соответствующие потоки данных с нужных очередей для получения последовательного потока информации (сообщений).

ETL Layer – уровень сбора, обработки и хранения данных

Третий этап обработки данных – уровень извлечения, преобразования и загрузки (ETL).



• Рис. 7. Функции ETL-уровня
 • Fig. 7. ETL functions

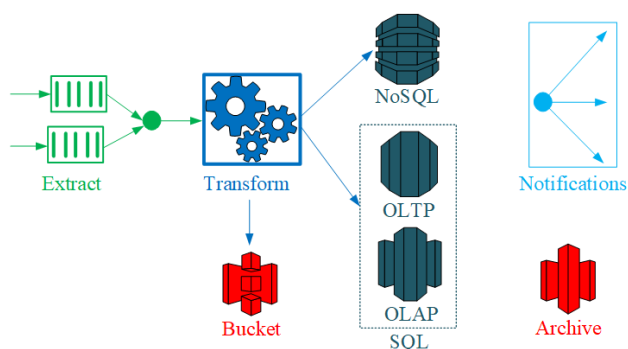
Очередность производимых операций связана с порядком следования уровней, слой ETL отвечает за операции, показанные на рис. 7, с данными, собранными со всех периферийных устройств и шлюзов.

На рис. 8 продемонстрирована структура уровня ETL.

На данном уровне процесс начинается со сбора данных, представляющего собой считывание информации из релевантных очередей. Затем следуют операции по трансформации информации.

Трансформация данных выполняется либо специальными облачными сервисами (например, Ламбда), либо с использованием вычислительных средств внутри контейнеров или виртуальных машин. Способ выполнения операции трансформации нужно выбирать в зависимости от возможностей разработки.

Операция хранения является последней на уровне ETL и заключается в сохранении, систе-



• Рис. 8. Схема реализации ETL-уровня системы IoT
 • Fig. 8. Implementation scheme of the ETL-level of the IoT-system

матизации и поиске необходимой информации. Некоторые технологии, включая базы данных, используются в зависимости от типов данных и того, как они будут применяться позже.

Бывают и такие ситуации, что нет возможности хранить все данные в базе данных, например, если их требуется хранить в виде записи. В таких случаях данные загружают в Bucket в виде записей, а метаданные этих записей будут храниться в базе данных.

Последним компонентом ETL-уровня является внутренняя функция оповещения (Notification), которая используется для сообщения о поступлении свежих данных, сохраненных для последующего анализа и представления.

Уровень аналитики (Big Data and Analytic Layer)

Уровень аналитики занимается анализом данных либо на облаке текущей системы (используются вычислительные мощности сервера, входящего в состав системы Интернета вещей), либо на сторонних сервисах, жертвуя скоростью работы в обмен на снижение нагрузки или повышение автономности работы. Данный уровень не имеет определенного стандарта исполнения, поэтому выполняется в зависимости от конкретного приложения IoT.

В основном этот уровень используется для работы с большими объемами данных и позволяет извлечь ситуативную информацию из набора периферийных устройств. Однако применение того или иного алгоритма, в первую очередь, определяется поставленной задачей, но, несмотря на необходимость выбора корректных алгоритмов, они все являются частью AI и ML. Помимо этого, отдельно выделяют еще один вид работы с данными – предсказывание будущих событий, или прогнозирование.

Уровень уведомления (Notification Layer)

В уровне уведомления существуют несколько компонентов, представляющих собой подпроцессы с реакцией на события. Им всем присущ алгоритм «уведомления по подписке». Это означает, что клиентское приложение создает связь с необходимыми событиями, а когда это событие происходит, приложение создает информационный сигнал для пользователя – уведомление. Приложения для уведомлений обычно представляют собой телефонные звонки (для экстренного оповещения), электронные письма или сообщения в мессенджерах. Для экономии заряда батареи такие приложения должны прекращать свою работу, но, в отличие от облачных сервисов, iOS и Android уже используют эту систему уведомлений.

Уровень представления (Presentation Layer)

В системных приложениях IoT возможны два разных типа системных взаимодействий – M2M (от машины к машине) и M2P (от машины к человеку). Уровень представления распространяется на слои BackEnd и Edge одновременно. Он занимается обработкой информации и ее визуальным представлением в виде списков, диаграмм, графиков для человека. Технологии, используемые для представления данных в системах Интернета вещей, обычно разрабатываются с использованием стандартизированного UI/UX.

Уровень представления ответственен за удобство обслуживания, настройки и изменения состояния системы, затрагивая, в том числе, периферийные устройства.

Уровень конфигурации (Configuration Layer)

Под уровень конфигурации подпадают два типа взаимодействия: «машина – машина» и «машина – человек». Слой конфигурации служит базой данных для состояний периферийных устройств, показанных на рис. 9.

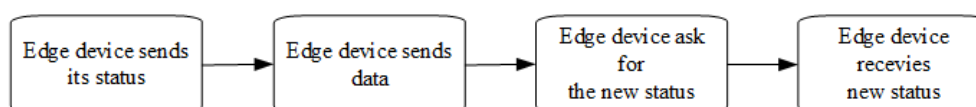
Данный уровень реализует процесс коммуникации с сервером для передачи данных о статусе периферийного устройства и его последующем обновлении (рис. 10). Алгоритм процесса коммуникации в текущем уровне следующий:

- 1) периферийное устройство сообщает свой статус;
- 2) устройство отправляет данные;



• Рис. 9. Возможные статусы периферийных устройств

• Fig. 9. Possible statuses of peripheral devices



• Рис. 10. Схема процесса коммуникации

• Fig. 10. The scheme of the communication process

- 3) устройство запрашивает новый статус;
- 4) устройство получает новый статус.

Сеть IoT-устройств

«Вещь» может относиться к любому материальному или нематериальному объекту. Объектом виртуального мира может быть прикладное программное обеспечение или мультимедийный материал, подключенный через коммуникационную сеть.

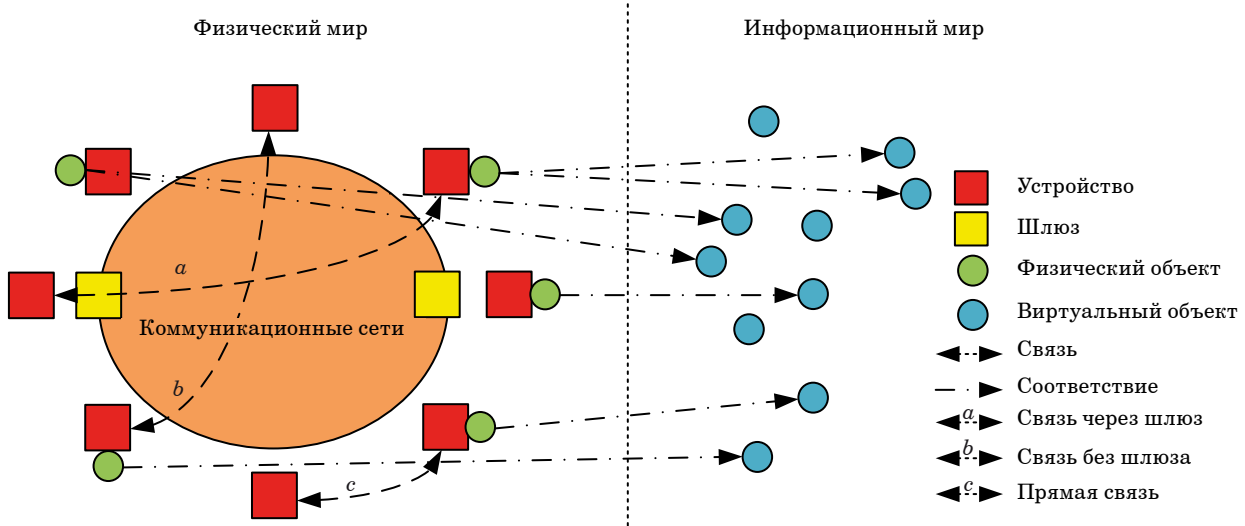
Устройствами (device) называется часть оборудования, участвующая в создании системы, имеющая обязательное требование – возможность обмена данными; зондирование и сенсоринг, приведение в действие «вещи» и способность выполнять различные операции с данными являются необязательными требованиями.

Виртуальные «вещи» могут существовать независимо от их физических проявлений, однако все физические предметы или вещи должны иметь хотя бы одну виртуальную копию. Решающее значение имеют устройства, которые собирают и распространяют информацию по сетям связи. Делиться информацией о возможном использовании возможно посредством шлюза и сети, только через сеть или напрямую между собой. Информационный поток между цифровыми и физическими «вещами» в системе Интернета вещей через сети связи показан на рис. 11.

МСЭ-Т поддерживает использование различных сетевых технологий в системах IoT. На рис. 11 приведен пример такого взаимодействия. Беспроводные одноранговые и ячеистые сети, как локальные, так и глобальные, используются для разработки систем IoT. Операции отправки данных, собранных устройствами, в соответствующие программные приложения и передачи команд от программных приложений устройствам осуществляются через сети связи.

Применение систем автоматического управления в IoT

В системах Интернета вещей важной частью ранней стадии проектирования является стадия моделирования процессов, которая выполняется для просчета задействованных в дальней-



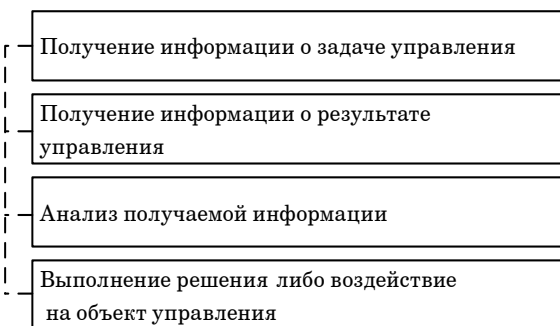
• Рис. 11. Схема отображения физических и виртуальных вещей по МСЭ-Т
 • Fig. 11. The scheme of displaying physical and virtual things according to ITU-T

шем объектов регулирования в исполнительных устройствах, а также для определения корректных входных данных и всех необходимых обратных связей. Моделируют систему Интернета вещей как систему автоматического управления, потому что развитие данной технологии «продвигает» ее как систему, работающую без участия человека в большинстве операций.

Любая процедура управления автоматической системой имеет следующие основные этапы (рис. 12).

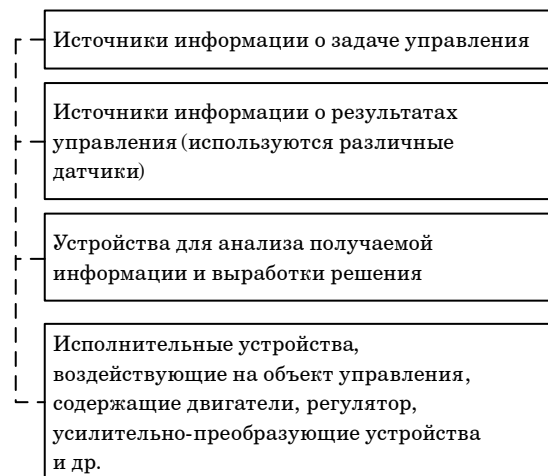
Компоненты, показанные на рис. 13, являются обязательными в любой системе управления.

Если проектируемая система включает в себя все описанные выше части, то она относится к виду «замкнутые системы». Замкнутые системы основываются на замыкании обратной связи от объекта управления к устройствам обработки информации. Модель замкнутой системы автоматического управления показана на рис. 14.

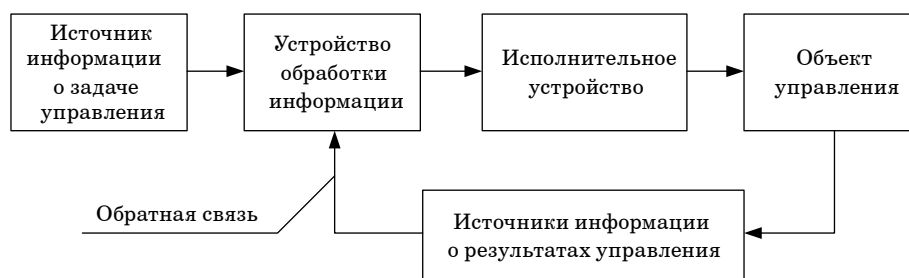


• Рис. 12. Основные этапы управления автоматической системой
 • Fig. 12. Main stages of automatic system control

Если рассматривать IoT, использующуюся для сбора данных, например, те же смартфоны, которыми пользуются почти все люди, то объектом управления является смартфон. Однако он не выполняет никаких действий, а управляется человеком; в таком случае система принимает стохастические данные, где входные данные соотносятся с выходными по нечеткой системе распределения. Таким способом Интернет вещей применим для распознавания дальнейших действий и формирования предложений в «исполнительных устройствах». Помимо смартфонов, сферами внедрения таких же систем в IoT могут являться искусственный интеллект, машинное обучение, техническое зрение. Это основные способы применения именно автоматической системы на



• Рис. 13. Составляющие элементы системы автоматического управления
 • Fig. 13. Components of the automatic control system



• Рис. 14. Структура замкнутой системы управления
 • Fig. 14. Structure of a closed control system

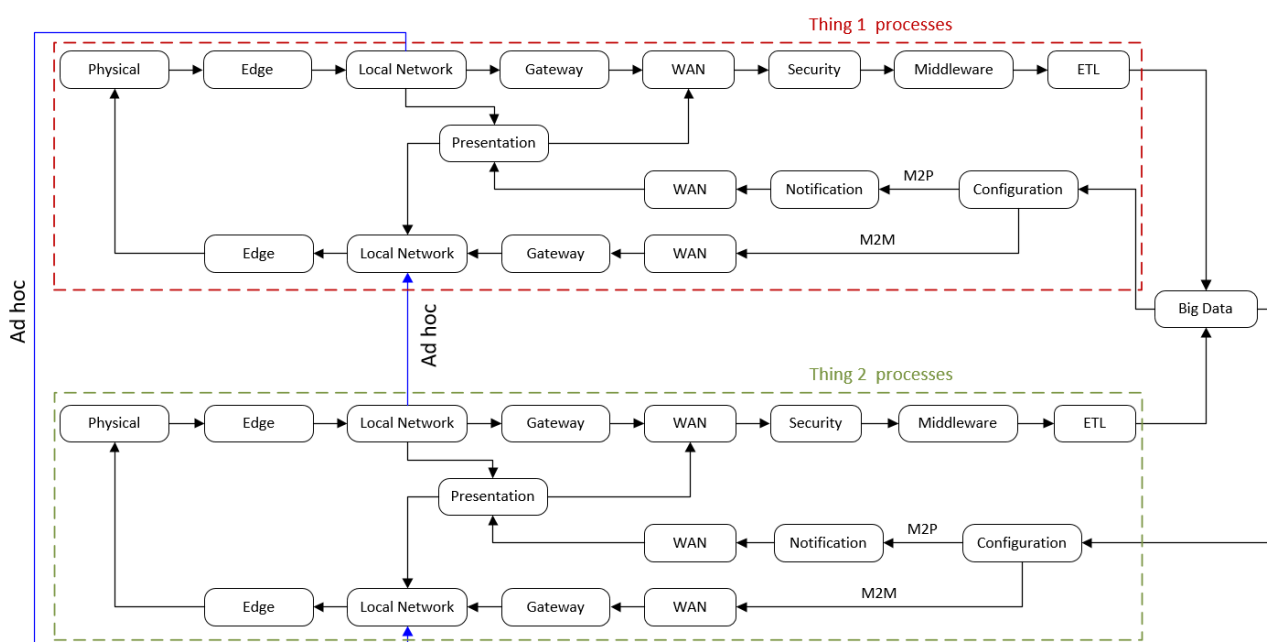
сегодняшнее время в IoT в сфере робототехники, соответственно, автоматические системы пока что внедряются как незамкнутые подсистемы для задач управления робототехническими комплексами со множеством объектов управления.

Формирование архитектуры Интернета вещей

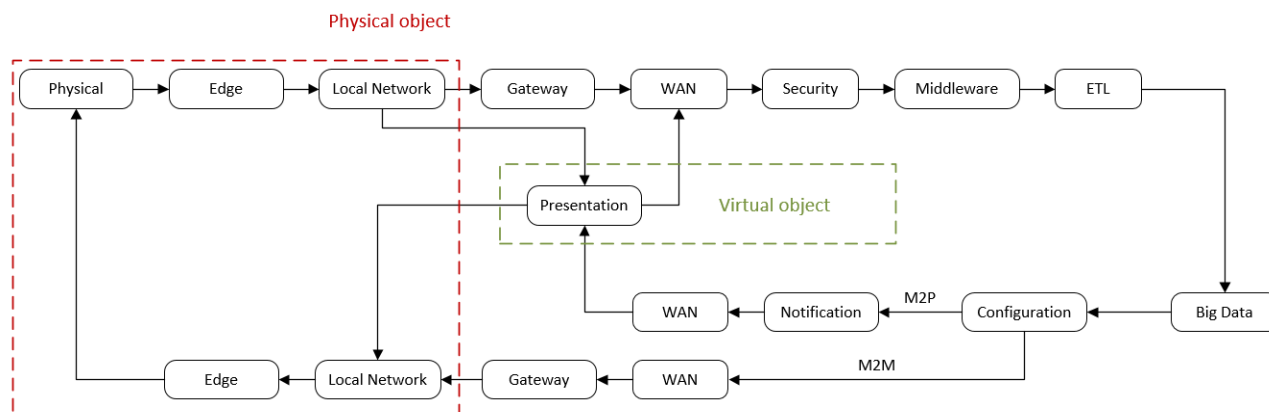
На рис. 15 показана архитектура Интернета вещей для формирования сети из двух «вещей» в виде физических и виртуальных объектов. Она включает в себя все 12 уровней, описанных выше, но уже представлена как замкнутая система управления. С физического уровня данные поступают на электронно-вычислительную машину (ЭВМ), после проходят маршрутизатор в локальной сети, где исходные данные предоставля-

ются на уровне представления, шлюза и к уровню ЭВМ другой «вещи» – связь Ad hoc. Пройдя уровень шлюза, данные поступают в глобальную сеть, проходят уровни защиты, внутрисетевой связи и уровень сборки, обработки, хранения. Следующим этапом будет уровень больших данных, который объединяет все «вещи» системы Интернета вещей, как физические, так и виртуальные. Затем на уровне конфигурации происходит преобразование исходных данных в два вида выходных: одни используются уровнем представления, другие предназначены для той ЭВМ, откуда были отправлены исходные данные.

Данная схема подробно описывает систему, использующую все функции Интернета вещей. В частных случаях может быть и один физический объект и один виртуальный – в таком случае архитектура построения системы будет ограничиваться лишь одной веткой схемы. Такой частный случай



• Рис. 15. Архитектура системы IoT для двух «вещей»
 • Fig. 15. IoT system architecture for two “things”



• Рис. 16. Архитектура IoT для одной «вещи»
 • Fig. 16. IoT architecture for one “thing”

показан на рис. 16. Есть и другой частный случай, когда одна «вещь» представлена физическим объектом, другая – только виртуальным; данный частный случай нами рассмотрен не будет.

Заключение

Сформированная схема архитектуры Интернета вещей, в сравнении с существующими ранее, содержит все уровни, описывающие технологию построения сети IoT, которые достаточны и необходимы для существования системы Интернета вещей. При этом схема представлена в виде мо-

дели системы автоматического управления, чем и является система Интернета вещей. Помимо прочего, схема отражает, каким образом рекомендуется проектировать обратную связь между уровнями для каждой «вещи» по отдельности. Также схема легко адаптируема для проектирования системы в виде частных случаев. Приведен пример одного из них, где система строится из одного физического и одного виртуального объекта. Итогом проведенной научной работы является сформированная схема, которая наиболее удобна при проектировании системы Интернета вещей благодаря преобразованию к модели системы автоматического управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ли П. Архитектура Интернета вещей / пер. с англ. М. А. Райтман. М.: ДМК Пресс, 2019. 456 с.
2. РБ.РУ: Интернет вещей – что это такое и как применять IoT в реальном бизнесе. URL: <https://rb.ru/longread/iot-cards/> (дата обращения: 13.05.2022).
3. Хабр: IoT-архитектура. URL: <https://habr.com/ru/post/455377/> (дата обращения: 15.05.2022).
4. Фролов Е. А. Моделирование процессов умного предприятия с применением многоагентных систем // Математ. методы и модели в высокотехнол. производстве. 2021. С. 172–173. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48471441> (дата обращения: 15.05.2022).

REFERENCES

1. Li P. Internet of things for architects. Moscow: DMK Press; 2019. 456 p. (In Russ.).
2. RB.RU. Internet of things – what is it and how to use IoT in real business. Available from: <https://rb.ru/longread/iot-cards/> [Accessed 15 May 2022].
3. Habr: IoT architecture. Available from: <https://habr.com/ru/post/455377/> [Accessed 15 May 2022].
4. Frolov E. A. Modeling of smart enterprise processes using multi-agent systems. Mathematical methods and models in high-tech production. 2021; pp. 172–173. (In Russ.). Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48471441> [Accessed 15 May 2022].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мастеров Андрей Петрович, инженер лаборатории робототехники Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системы Интернета вещей, формирование систем автоматического управления, информационная безопасность.

Белай Василий Евгеньевич, ассистент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системы Интернета вещей, формирование систем автоматического управления, информационная безопасность.

Выграновская Арина Вячеславовна, инженер лаборатории робототехники Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системы Интернета вещей, формирование систем автоматического управления, информационная безопасность.

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

Область научных интересов – системы Интернета вещей, формирование систем автоматического управления, информационная безопасность.

Поступила после рецензирования 31.03.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Received 22.03.2023

Masterov Andrei P., Engineer at the Laboratory of the Robotics of the SUAI School of Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – Internet of things systems, formation of automatic control systems, information security.

Belay Vasily E., Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – Internet of things systems, formation of automatic control systems, information security.

Vygranovskaya Arina V., Engineer at the Laboratory of the Robotics of the SUAI School of Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – Internet of things systems, formation of automatic control systems, information security.

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

Research interests – Internet of things systems, formation of automatic control systems, information security.

Поступила в редакцию 22.03.2023

Revised 31.03.2023

Accepted 09.10.2023

Визионерская инноватика как инструмент цифровой трансформации

Станислав Анатольевич Назаревич¹

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

Елена Андреевна Пашина¹

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

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

Аннотация. Настоящая статья посвящена новому направлению – визионерской инноватике. Представлен концептуальный образ нового мышления при обучении студентов направления «Инноватика». Визионерская инноватика – это процесс разработки и внедрения новаторских и революционных идей, концепций, продуктов или услуг на основе визионерского мышления. Визионеры – это люди, которые видят и понимают потенциал будущих изменений, возможностей и работают над созданием инноваций. Визионерская инноватика предполагает умение предсказывать и анализировать будущие тенденции и потребности рынка, исследовать новые технологии и разрабатывать стратегии, чтобы предложить новые и уникальные решения, включая обеспечение жизненных циклов, работу над созданием новых продуктов, услуг или бизнес-моделей, которые могут полностью изменить существующие отрасли или создать совершенно новые.

Ключевые слова: визионерская инноватика, визионерство, визионер-инноватик

Для цитирования: Назаревич С. А., Пашина Е. А. Визионерская инноватика как инструмент цифровой трансформации // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 43–48. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-43-48.

Original article

Visionary innovation as a tool for digital transformation

Stanislav A. Nazarevich¹

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

Elena A. Pashina¹

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

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

Abstract. This article is devoted to such a new field as visionary innovation. A conceptual image of new thinking when teaching students in the areas of innovation is presented. Visionary innovation is the process of developing and implementing innovative and revolutionary ideas, concepts, products or services based on visionary thinking. Visionaries are people who see and understand the potential for future change, opportunity and work to create innovation. Visionary innovation involves the ability to predict and analyze future trends and market needs, explore new technologies and develop strategies to offer new and unique solutions. This includes life cycle support, working to create new products, services or business models that can completely disrupt existing industries or create entirely new ones.

Keywords: visionary innovation, visionaryism, visionary-innovator

For citation: 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.

Введение

В настоящее время существуют устойчивые тренды и сформировалась определенная мода на эвристические инструменты, которые применяются непосредственно для решения сложных организационно-технологических проблем внутри производственной системы. Однако существующие структурные и кадровые возможности производственной системы построены таким образом, что возникает дефицит кадрового ресурса

в отношении поставленных задач по развитию, совершенствованию миссии, ценности и видения организационной системы.

Структурное понимание проблем в технологическом процессе коллизирует при дуалистическом подходе, принятом в традиционных производственных системах, как «человек – функция». Ограничения, созданные существующими трудовыми функциями, без учета использования интеллектуального потенциала персонала препятствуют синтезу и интеграции новых ре-

шений, оставляя в практике лишь шаблонные методы решения производственных проблем. Традиционные подходы к обучению специалистов «на местах» требуют решения тактических задач в текущей инфраструктуре, без развития и изменений. Стабильность и консерватизм – главные факторы, обладающие весом в процессах принятия решений, которые реализуются посредством определенного персонала, допущенного к ресурсам и механизмам управления. Решаемые задачи не связаны с преодолением организационных патологий, дефицита интеллектуальной собственности, сложных и системных проблем, возникающих на межпроцессных этапах жизненного цикла производимого изделия.

Подобные проблемы возникают в организационных системах, в которых отсутствуют корпоративная культура и понимание стратегической цели в общем видении и той составляющей, которая символизирует миссию организационной системы. Поэтому сейчас широкую популярность приобретает визионерская инноватика, позволяющая создавать образы целей, к которым движется организационная система, через набор ценностей организации и формирование устойчивого видения, каким путем нужно приходиться к поставленным стратегическим, конкурентным целям [1].

Следовательно, визионерство – способность к созданию управляемого образа, именно в тех рамках, в которых организационная система имеет технологические и производственные возможности создавать эталонные изделия или перспективные образцы на ближайшие 10–15 лет. Таким образом, визионерская инноватика включает в себя не только техническую подготовку специалистов, связанных с формированием базовых компетенций, указывающих понимание природы, технико-технологической сущности производимого изделия, базовых этапов жизненного цикла, которые проходят изделия, но и моду, тенденции и современные перспективы развития в соответствии с теми критическими технологиями, которые положены в основу существующей отрасли.

В сравнении с существующими аналогами, визионерская инноватика основывается на таких механизмах и инструментах, как:

- карта науки;
- карта глобальных вызовов;
- карта трендов;
- методики форсайтов;
- фронтирование проблемных продуктов.

Отдельным элементом являются эвристические инструменты для построения устойчивых модификаторов продуктов и изделий с элементами всеобщего управления качеством, позволя-

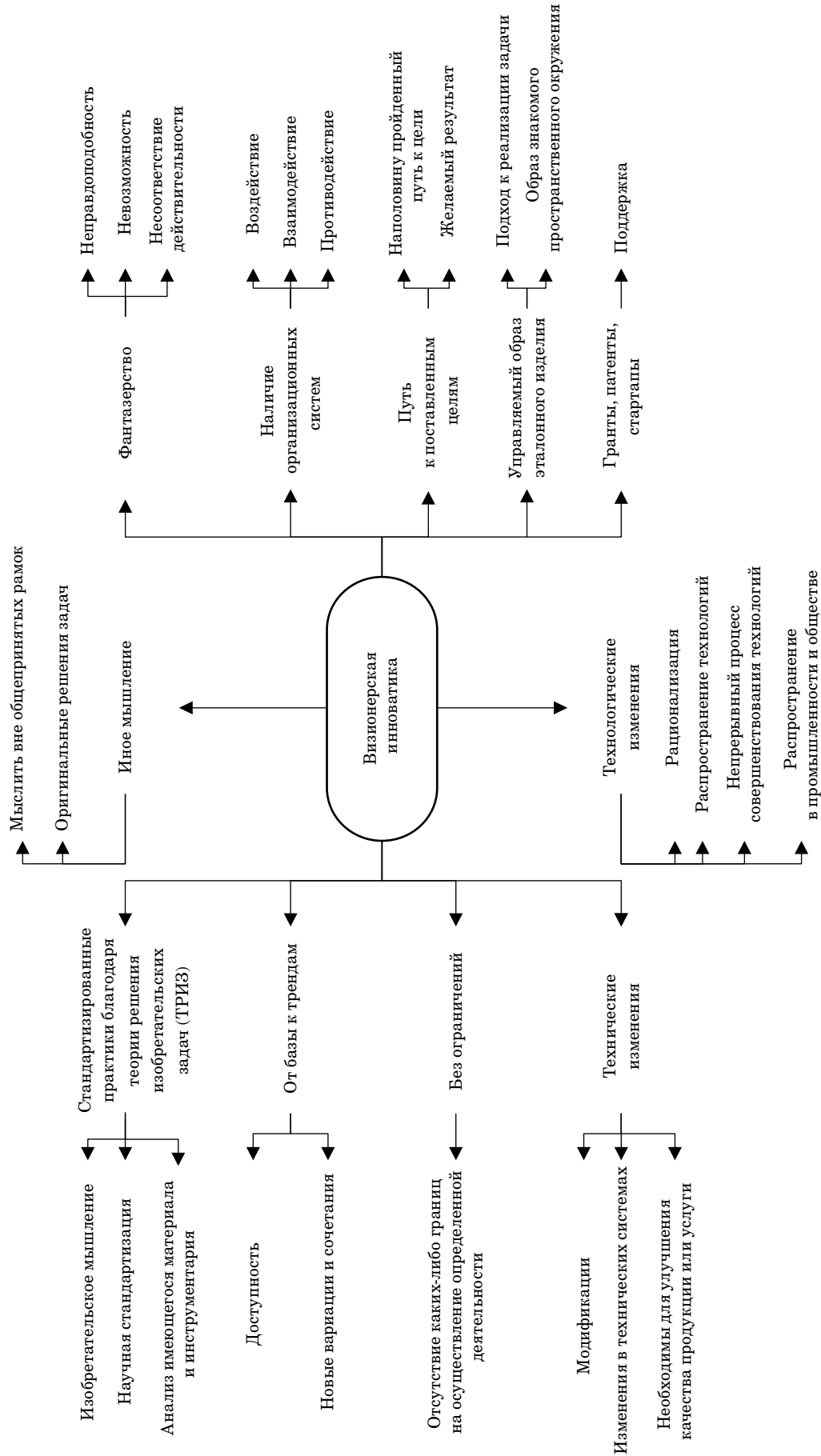
ющие подвергать анализу существующие производственные мощности в целях понимания возможности воспроизводства нововведения. Совершенствование восприятия организационных систем технических и технологических изменений, которые приведут предприятие к новому уровню научно-технического прогресса, – это перспективная и жизнестойкая цель для инноваторов-визионеров в настоящих условиях.

Визионерская инноватика имеет множество аналогов, таких как технологическое предпринимательство, защита интеллектуальной собственности, техническая инноватика. Все субституты связаны с созданием стартапов и индивидуальным предпринимательством и сводятся к созданию прототипа путем как персональных достижений, так и командной работы. Коммерциализация прототипа по известным методикам с помощью получения грантов, субсидий или иных форм государственной или частной поддержки может значительно увеличить шансы на успех проекта и обеспечить его финансовую устойчивость.

Однако визионерская инноватика отличается от технической тем, что визионер-инноватик создает управляемый образ будущего, основанный на системном подходе, включающий в себя управление впечатлениями от эксплуатации продукта и управление инфраструктурой, которая будет создавать продукт и всю систему обеспечения. Все это позволит формировать новые искусственные виды спроса, предложений и услуг.

Таким образом, инструменты визионерства могут успешно сочетаться с существующими аппаратно-программными решениями, включающими в себя цифровые способы, либо параметрические комбинации вариантов, либо оптимальные множества элементов в рамках определенной и ограниченной ситуации с четким исходом (рис. 1) [2, 3].

Одним из дополнительных конкурентных преимуществ визионерской инноватики является момент ее возникновения. Переходные процессы при смене парадигм, которые мы можем наблюдать сегодня, – переход от автоматизации к цифровизации с помощью новых технологий Индустрии 4.0. Это основное и конкурентное преимущество, позволяющие использовать нестандартное мышление, критический и системный подход, эвристическую эмпатию и другие способности творческой личности изобретателя и рационализатора при структурировании и совершенствовании производственных систем. Создание нового типа специалиста – инноватора-визионера – позволит совершить технологический прорыв в вопросах импортозамещения и создания новых перспективных образцов техники и технологии.



• Рис. 1. Ментальная карта визионерской инноватика
 • Fig. 1. The mental map of visionary innovation

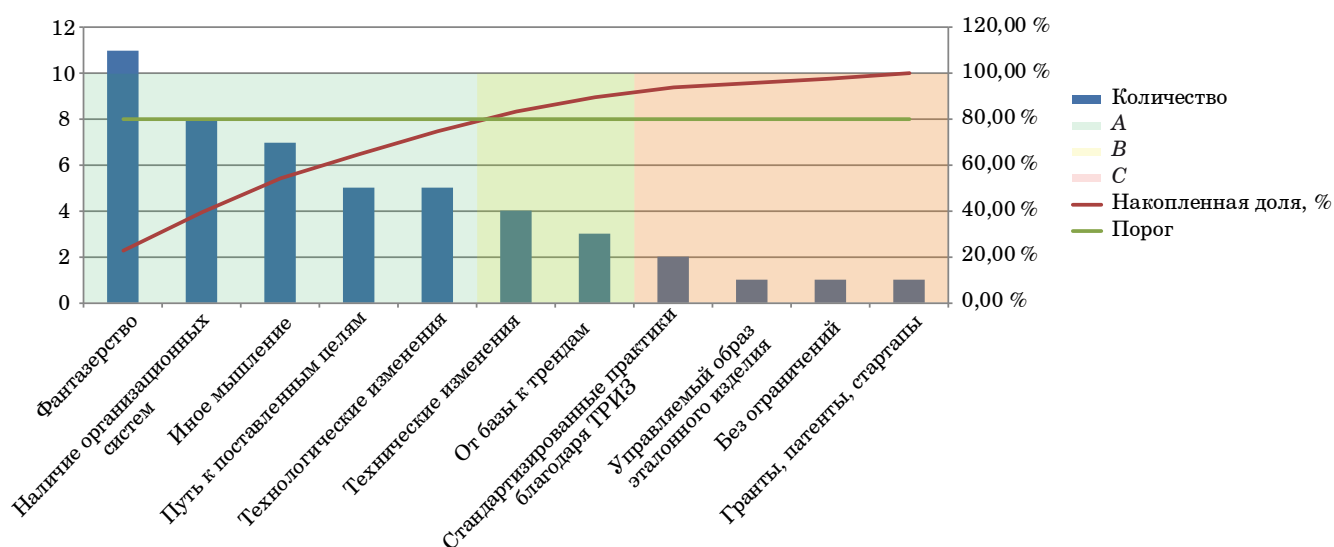
Результативность применения визионерской инноватики может измеряться с помощью создания баз данных по определенным локациям и сферам, в которых будет присутствовать множество предложенных проектов по модернизации или модификации существующих технических решений, доказавших свою практическую эффективность с перспективными и паритетными проектами, позволяющими произвести технологический скачок в отрасли через формирование нового технологического видения о лучшем каче-

стве предоставления услуг по созданию ценности для конечного потребителя [4].

Сформулируем наименования именно тех компонентов, которые чаще всего будут использоваться при формировании визионерской инноватики, которые составляют ее базовую структуру, и представим результат с помощью традиционного инструмента управления качеством, позволяющего в процентном соотношении оценить их влияние (таблица).

- *Протокол разработки диаграммы Парето для компонентов визионерской инноватики*
- *Pareto chart for components of visionary innovation*

Компонент	Число компонентов	Доля, %	Накопленная доля, %	Порог	ABC
Фантазерство	11	22,92	22,92	80,00	A
Наличие организационных систем	8	16,67	39,58	80,00	A
Иное мышление	7	14,58	54,17	80,00	A
Путь к поставленным целям	5	10,42	64,58	80,00	A
Технологические изменения	5	10,42	75,00	80,00	A
Технические изменения	4	8,33	83,33	80,00	B
От базы к трендам	3	6,25	89,58	80,00	B
Стандартизированные практики благодаря ТРИЗ	2	4,17	93,75	80,00	B
Управляемый образ эталонного изделия	1	2,08	95,83	80,00	C
Без ограничений	1	2,08	97,92	80,00	C
Гранты, патенты, стартапы	1	2,08	100,00	80,00	C
Итого	48				



- *Рис. 2. Диаграмма Парето, показывающая использование инструментов визионерской инноватики*
- *Fig. 2. Pareto diagram showing the use of visionary innovation tools*

Анализируя результаты, показанные на рис. 2, можно сделать вывод, что виды мышления и другие активности творческой личности являются основным базовым элементом для формирования инноватора-визионера. Поэтому именно эти навыки нужно развивать у будущих специалистов для формирования нового сообщества, которое способно трансформировать консервативные шаблоны и создать прецеденты для реализации технологических изменений [5].

Подготовка нового специалиста позволит наполнить информационную емкость и создать сообщество визионеров-инноватиков, практикующих развитие производственных систем и технологических процессов, секторы услуг предоставления культурно-массовых и развлекательных мероприятий, городской урбанистики, городской среды и начать движение к формированию образа «нового гражданина», воспитанного на принципах и концепциях создания творческой личности.

Визионерская инноватика позволит расширить системное и критическое мышление, опираясь на такой инструмент верификации факторов, как фактчекинг. Построение гипотез, нахождение подтверждений и рационального использования тех источников данных, которые представ-

ляют собой объективную и комплексную совокупность сведений, – это элементы фактчекинга для отработки сценариев и возможных последствий доверительного отношения к информации и использования ее в качестве аргумента при принятии решений об изменениях [6].

Заключение

Результаты деятельности инноваторов-визионеров позволят сформировать не только набор рационализаторских идей, но и понять, какой механизм нужен для сепарации информации, позволяющий отделить информационный шум от действительно практически значимых данных.

Таким образом, разработка концепции по созданию новых подходов к обучению молодых специалистов в рамках визионерской инноватики позволит создать новое сообщество специалистов, которые могут не только воспринимать технологические инновации и нововведения в области Индустрии 4.0, но и решать проблемы, связанные с организационными патологиями, трансформацией консервативных шаблонов принятия решения, и формировать стратегию развития производственных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Туккель И. Л., Сурина А. В., Культин Н. Б. Управление инновационными проектами. СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 416 с.
2. Туккель И. Л. Методы и инструменты управления инновационным развитием промышленных предприятий. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 209 с.
3. Зарецкий А. Д., Иванова Т. Е. Промышленные технологии и инновации. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
4. Меньяев М. Ф. Цифровое управление инновационными проектами: учеб. пособие для вузов. СПб.: Питер, 2020. 304 с.
5. Фасхиев Х. А. Модель управления инновационной деятельностью предприятия // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 4. С. 11–28.
6. Андрейчиков А. В. Стратегический менеджмент в инновационных организациях: системный анализ и принятие решений. М.: Вуз. учеб.; ИНФРА-М, 2013. 394 с.

REFERENCES

1. Tukkel I. L., Surina A. V., Kultin N. B. Management of innovative projects. SPb.: BHV-Petersburg; 2017. 416 p. (In Russ.).
2. Tukkel I.L. Methods and tools of management of innovative development of industrial enterprises. SPb.: BHV-Petersburg; 2013. 209 p. (In Russ.).
3. Zaretsky A. D., Ivanova T. E. Industrial technologies and innovations. SPb.: Piter; 2018. 480 p. (In Russ.).
4. Menyayev M. F. Digital management of innovation projects: study guide for universities. SPb.: Piter; 2020. 304 p. (In Russ.).
5. Faskhiev H. A. Model of management of innovative activity of the enterprise. Management in Russia and abroad. 2013;(4):11–28. (In Russ.).
6. Andreychikov A. A. Strategic management in innovative organizations: system analysis and decision-making. Moscow: Vuz. Textbook; INFRA-M; 2013. 394 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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.

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.

Поступила в редакцию 14.09.2023

Поступила после рецензирования 22.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

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.

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

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

Received 14.09.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 09.10.2023

Спектральный анализ и простейшие решения модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза

Александр Олегович Смирнов¹

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

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

Аннотация. В работе с помощью метода матрицы монодромии строится иерархия интегрируемых нелинейных дифференциальных уравнений и исследуются спектральные кривые, ассоциированные с многофазными решениями. Приведены примеры простейших нетривиальных решений модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза и соответствующие им спектральные кривые.

Ключевые слова: нелинейное уравнение, спектральная кривая, солитон, кинк, многофазное решение, матрица монодромии

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-11-00196 (<https://rscf.ru/project/22-11-00196/>).

Для цитирования: Смирнов А. О. Спектральный анализ и простейшие решения модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 49–55. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-49-55.

Original article

Spectral analysis and simplest solutions of the modified Korteweg – de Vries equation

Aleksandr O. Smirnov¹

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

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

Abstract. Using the monodromy matrix method, a hierarchy of integrable nonlinear differential equations is constructed and spectral curves associated with multiphase solutions are investigated. Examples of the simplest nontrivial solutions of the modified Korteweg – de Vries equation and their spectral curves are given.

Keywords: nonlinear equation, spectral curve, soliton, kink, multiphase solution, monodromy matrix

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant no. 22-11-00196 (<https://rscf.ru/project/22-11-00196/>).

For citation: Smirnov A. O. Spectral analysis and simplest solutions of the modified Korteweg – de Vries equation. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):49–55. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-49-55.

Введение

Нелинейные модели играют большую роль при описании различных явлений и процессов в технике и физике. Особое место среди нелинейных моделей занимают интегрируемые динамические системы, в которых, несмотря на нелинейность, можно полностью однозначно описать поведение ее составляющих в любой момент времени. Интегрируемые нелинейные динамические системы обычно описываются дифференциальными, разностными или дифференциально-разностными уравнениями, скалярными, векторными или матричными. Интегрируемые нелинейные дифференциальные уравнения могут быть получены в виде условия совместности

двух линейных дифференциальных операторов, называемых парой Лакса. В случае матричных дифференциальных операторов пара Лакса имеет вид (см., например, [1–5]):

$$\begin{aligned}\Psi_x &= U\Psi, \\ \Psi_t &= V\Psi.\end{aligned}$$

Здесь переменные нижние индексы означают производные по соответствующим переменным. Матрицы U и V , как правило, являются многочленами по спектральному параметру λ . Вместе с тем есть и модели, где эти матрицы являются рациональными функциями от спектрального параметра.

В отличие от случаев линейных моделей, когда спектральный анализ проводится с помощью

преобразования Фурье самого сигнала, в нелинейном случае изучаются спектральные данные первого оператора пары Лакса [1, 3, 4]. Обычно спектр линейного дифференциального оператора состоит из двух частей – непрерывного и дискретного спектров. Конечнотонными называются матрицы, для которых спектр соответствующего оператора состоит из конечного числа зон непрерывного спектра. В предельном случае некоторые из зон могут стянуться в точку и образовать часть дискретного спектра. Также в случае конечнотонной матрицы по непрерывному спектру строится спектральная кривая $\Gamma = \{(\mu, \lambda)\}$, точки которой определяются двумя комплексными координатами [4, 6]. Одним из методов построения спектральных кривых, ассоциированных с конечнотонными решениями интегрируемых нелинейных уравнений, является метод матрицы монодромии, предложенный Б. А. Дубровиным в работе [6] и рассмотренный нами в работах [7–9].

Ключевой особенностью интегрируемых нелинейных уравнений является тот факт, что они принадлежат какой-либо иерархии, т. е. бесконечной последовательности интегрируемых нелинейных уравнений, и что существуют функции, являющиеся решениями всех уравнений иерархии одновременно. Эти уравнения являются условиями совместности следующих последовательностей пар Лакса:

$$\begin{aligned} \Psi_x &= U\Psi, \\ \Psi_{t_k} &= V_k\Psi. \end{aligned}$$

Данное свойство позволяет строить так называемые «смешанные» интегрируемые нелинейные уравнения, представляющие собой линейные комбинации уравнений из рассматриваемой иерархии (см., например, [10]).

В настоящей работе мы демонстрируем метод построения спектральных кривых и соответствующих им простейших решений интегрируемых нелинейных уравнений на примере иерархии модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза (см., например, [3]). Работа состоит из введения, четырех разделов и заключительных замечаний. В первом разделе мы проводим исследование матрицы монодромии для иерархии модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза, находим стационарные решения, которым удовлетворяют многофазные решения, и получаем уравнение спектральной кривой. Во втором разделе нами предложена последовательность вторых операторов пары Лакса, дающая иерархию эволюционных интегрируемых нелинейных уравнений. Далее приведены при-

меры простейших решений модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза, а также указаны спектральные кривые, ассоциированные с этими решениями. В заключительных замечаниях мы обсуждаем направления дальнейших исследований, связанных с результатами данной работы.

Матрица монодромии и ее свойства

Рассмотрим следующее линейное дифференциальное уравнение:

$$\Psi_x = U\Psi \quad (1)$$

с матрицами

$$U = \lambda J + Q, \quad (2)$$

$$J = \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} 0 & v(x) \\ v(x) & 0 \end{pmatrix}, \\ i^2 = -1, v(x) \in \mathbb{R}. \quad (3)$$

Предположим, что существует матрица монодромии M , такая, что матричная функция $\Psi = M\Psi$ также является решением уравнения (1). Тогда матрица M удовлетворяет уравнению

$$M_x + MU - UM = 0. \quad (4)$$

В случае конечнотонных потенциалов Q матрица монодромии M является многочленом по спектральному параметру λ [6]:

$$M = \sum_{j=0}^N m_j(x)\lambda^j. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях спектрального параметра, имеем:

1) уравнение на старший матричный коэффициент:

$$[J, m_N] = 0;$$

2) рекуррентные соотношения:

$$i\partial_x m_j + [J, m_{j-1}] + [Q, m_j] = 0, j = 1, \dots, N;$$

3) стационарные уравнения:

$$i\partial_x m_0 + [Q, m_0] = 0.$$

Из рекуррентных соотношений вытекает следующая структура матрицы M :

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

где $\mathbf{V}_1 = \lambda \mathbf{U} + \mathbf{V}_1^0$, $\mathbf{V}_{k+1} = \lambda \mathbf{V}_k + \mathbf{V}_{k+1}^0$, $k \geq 1$;

$$\mathbf{V}_k^0 = \begin{pmatrix} F_k & H_k \\ G_k & -F_k \end{pmatrix}.$$

При этом элементы матриц \mathbf{V}_k^0 также связаны между собой рекуррентными соотношениями, которые в данном случае имеют вид:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{i}{2} v_x, \quad G_1 = -\frac{i}{2} v_x, \\ \partial_x F_k &= (G_k - H_k) v, \\ H_{k+1} &= \frac{i}{2} \partial_x H_k + i v F_k, \\ G_{k+1} &= -\frac{i}{2} \partial_x G_k + i v F_k. \end{aligned} \quad (6)$$

Из уравнений (6) нетрудно получить соотношения вещественности:

$$\begin{aligned} G_{2k-1} &= H_{2k-1}^* = -H_{2k-1}, \\ G_{2k} &= H_{2k}^* = H_{2k}, \\ F_{2k-1} &\in i\mathbb{R}, \quad F_{2k} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

и выражения для первых элементов:

$$\begin{aligned} F_1 &= -\frac{i}{2} v^2, \\ H_2 = G_2 &= \frac{1}{2} v^3 - \frac{1}{4} v_{xx}, \\ H_3 = -G_3 &= \frac{3i}{4} v^2 v_x - \frac{i}{8} v_{xxx}, \\ F_3 &= -\frac{3i}{8} v^4 - \frac{i}{8} v_x^2 + \frac{i}{4} v v_{xx}, \\ H_4 = G_4 &= \frac{3}{8} v^5 - \frac{5}{8} v v_x^2 - \frac{5}{8} v^2 v_{xx} + \frac{1}{16} v_{xxxx}. \end{aligned}$$

В этих обозначениях стационарные уравнения, которым удовлетворяют конечнозонные (многофазные) решения, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} H_{n+1} + \sum_{j=1}^n c_j H_{n+1-j} + c_{n+1} v &= 0, \\ G_{n+1} + \sum_{j=1}^n c_j G_{n+1-j} + c_{n+1} v &= 0. \end{aligned}$$

Поскольку $G_k = H_k^*$, то эти уравнения эквивалентны следующим:

$$\operatorname{Re} H_{n+1} + \sum_{j=1}^n c_j \operatorname{Re} H_{n+1-j} + c_{n+1} v = 0,$$

$$\operatorname{Im} H_{n+1} + \sum_{j=1}^n c_j \operatorname{Im} H_{n+1-j} = 0.$$

В первом стационарном уравнении индексы только четные, во втором – только нечетные. Условие совместности стационарных уравнений накладывает ограничения на постоянные c_j .

Зная матрицу монодромии \mathbf{M} для оператора (1) с матрицами (2), (3), нетрудно найти уравнение соответствующей спектральной кривой, поскольку им является характеристическое уравнение матрицы \mathbf{M} :

$$\det(\mathbf{M} - i\mu \mathbf{I}) = 0,$$

которое в данном случае имеет вид:

$$\mu^2 = \det \mathbf{M} = \lambda^{2n+2} + \sum_{j=1}^{2n+2} f_j \lambda^{2n+2-j}. \quad (8)$$

Зная стационарные уравнения и коэффициенты уравнения спектральной кривой, в простейших случаях можно найти элементы матрицы \mathbf{Q} . Отметим, что из уравнения спектральной кривой (8) следует, что ее род равен n при отсутствии кратных корней многочлена, стоящего в правой части.

Эволюционные интегрируемые нелинейные уравнения

Зададим второе уравнение пары Лакса следующим образом:

$$\Psi_{t_k} = 2^{2k} \mathbf{V}_{2k} \Psi.$$

Тогда из условия совместности

$$(\Psi_x)_{t_k} = (\Psi_{t_k})_x$$

или из соотношения

$$\partial_x \mathbf{V}_{2k} - 2^{-2k} \partial_{t_k} \mathbf{U} + \mathbf{V}_{2k} \mathbf{U} - \mathbf{U} \mathbf{V}_{2k} = \mathbf{0}$$

вытекают эволюционные нелинейные уравнения:

$$\partial_{t_k} v = 2^{2k} \partial_x H_{2k}. \quad (9)$$

Первые из этих уравнений имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} v_{t_1} &= 6v^2 v_x - v_{xxx}, \\ v_{t_2} &= 30v^4 v_x - 10v_x^3 - 40v v_x v_{xx} - 10v^2 v_{xxx} + v_{xxxxx}. \end{aligned} \quad (10)$$

Поскольку первое из уравнений (10) является модифицированным уравнением Кортевега – де Фриза, то последовательность уравнений (9) определяет иерархию модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза, а второе из уравнений (10) является вторым уравнением из данной иерархии.

Как уже говорилось выше, существуют функции $v(x, t_1, t_2, \dots)$, удовлетворяющие всем уравнениям иерархии одновременно. Заменяя в данной функции аргументы по формуле $t_j = \alpha_j(t)$, получаем решения смешанного уравнения данной иерархии:

$$\partial_t v = \sum_{j \geq 1} \alpha'_j(t) 2^{2j} H_{2j}.$$

Решения при $n = 1$

В случае $n = 1$ матрица монодромии равна:

$$M = V_1 + c_1 U + c_2 J.$$

Вычисляя ее характеристическое уравнение, получаем следующее уравнение спектральной кривой:

$$\mu^2 = \lambda^4 + 2c_1 \lambda^3 + (c_1^2 + 2c_2^2) \lambda^2 + f_3 \lambda + f_4,$$

где

$$\begin{aligned} f_3 &= c_1 (2c_2 - v^2), \\ f_4 &= c_2^2 + (c_2 - c_1^2) v^2 + \frac{1}{4} v^4 - \frac{1}{4} v_x^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Дополнительные ограничения на функцию v , которые вытекают из стационарных уравнений, имеют вид:

$$H_2 + c_2 v = 0, \quad c_1 H_1 = 0,$$

или

$$v_{xx} = 2v^3 + 4c_2 v, \quad c_1 v_x = 0. \quad (12)$$

Из уравнений (12) следует, что, если $c_1 \neq 0$, то $v = \sqrt{-2c_2}$, а уравнение спектральной кривой имеет вид:

$$\mu^2 = (\lambda + c_1)^2 (\lambda^2 + 2c_2).$$

Нетрудно видеть, что данная кривая является вырождением кривой рода $g = 1$.

Таким образом, для построения нетривиальных решений модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза мы должны положить

$c_1 = 0$. Из уравнений (11) и (12) следует, что при $c_1 = 0$ функция v удовлетворяет уравнению

$$v_x^2 = v^4 + 4c_2 v^2 + 4c_2^2 - 4f_4, \quad (13)$$

а уравнение соответствующей спектральной кривой имеет вид:

$$\mu^2 = \lambda^4 + 2c_2 \lambda^2 + f_4.$$

Из уравнения (13) вытекает, что $v(x)$ является эллиптической функцией Якоби [11, 12] или ее вырождением.

Пусть $v(x) = A \operatorname{sn}(2ax; k)$, где $\operatorname{sn}(x; k)$ есть эллиптический синус, удовлетворяющий дифференциальному уравнению

$$[\operatorname{sn}'(x)]^2 = (1 - \operatorname{sn}^2(x))(1 - k^2 \operatorname{sn}^2(x)), \quad 0 < k < 1.$$

Тогда

$$A = 2ak, \quad c_2 = -a^2(1 + k^2), \quad f_4 = a^4(1 - k^2)^2.$$

При данных значениях постоянных спектральная кривая имеет следующее уравнение:

$$\mu^2 = (\lambda^2 - (1 + k^2)a^2)(\lambda^2 - (1 - k^2)a^2).$$

Поскольку уравнение (13) является автономным, то решения уравнений (10) имеют вид:

$$v(x, t_1, t_2, \dots) = 2ak \operatorname{sn}(X; k), \quad X = 2ax + \sum_{j \geq 1} b_j t_j. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (10) и упрощая, имеем:

$$b_1 = 8a^3(1 + k^2), \quad b_2 = 32a^5(1 + 4k^2 + k^4).$$

Периодическое решение $v(x, t_1)$ модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза при $a = 1, k = 0,7$ изображено на рис. 1.

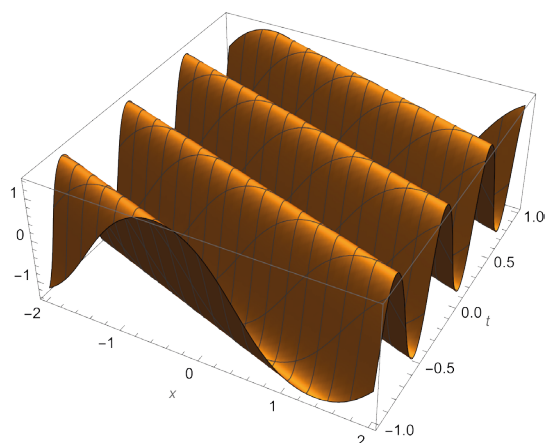
Нетрудно видеть, что род спектральной кривой равен $g = 1$ и что по ее точкам ветвления можно восстановить решение (14) с точностью до начальной фазы.

В пределе при $k \rightarrow 1$ периодическое решение (14) переходит в решение, которое называется «кинк»:

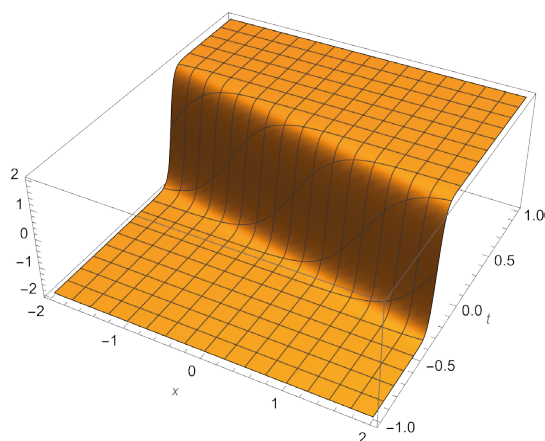
$$v = 2a \tanh(2ax + 16a^3 t_1 + 192a^5 t_2 + \dots). \quad (15)$$

На рис. 2 изображено решение $v(x, t_1)$ модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза в виде кинка (15) при $a = 1$. Заметим, что одна из областей применения кинков – это описание доменных стенок в магнетиках. Спектральная кривая решения (15) определяется уравнением

$$\mu^2 = \lambda^2 (\lambda + 2a)(\lambda - 2a).$$



• *Рис. 1. Решение (14) при $a = 1, k = 0,7$*
 • *Fig. 1. Solution (14) for $a = 1, k = 0.7$*



• *Рис. 2. Решение (15) при $a = 1$*
 • *Fig. 2. Solution (15) for $a = 1$*

Данная кривая является вырождением кривой рода 1, поскольку многочлен, стоящий в правой части уравнения, имеет кратный корень. Нетрудно видеть, что решение (15) по уравнению соответствующей ему спектральной кривой также восстанавливается однозначно, с точностью до начальной фазы.

Решения при $n = 2$

При $n = 2$ матрица монодромии равна:

$$M = V_2 + c_1 V_1 + c_2 U + c_3 J,$$

а стационарные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} c_1 v_{xx} - 2c_1 v^3 - 4c_3 v &= 0, \\ v_{xxx} - 6v^2 v_x - 4c_2 v_x &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Интегрируя второе из стационарных уравнений (16), получаем:

$$v_{xx} - 2v^3 - 4c_2 v = 4\tilde{c}_1, \quad (17)$$

где \tilde{c}_1 есть постоянная интегрирования. Понижая порядок уравнения (17), снова получаем уравнение эллиптической функции:

$$v_x^2 = v^4 + 4c_2 v^2 + 8\tilde{c}_1 v + 4\tilde{c}_2, \quad (18)$$

где \tilde{c}_2 есть вторая постоянная интегрирования.

Нетрудно видеть, что стационарные уравнения (16) совместны в двух случаях:

- 1) при $c_1 \neq 0, c_3 = c_1 c_2, \tilde{c}_1 = 0$;
- 2) при $c_1 = c_3 = 0$.

Вычисляя уравнение спектральной кривой при $n = 2$, имеем:

$$\begin{aligned} \mu^2 &= \lambda^6 + 2c_1 \lambda^5 + (c^2 + 2c_2) \lambda^4 + \\ &+ 2(c_1 c_2 + c_3) \lambda^3 + f_4 \lambda^2 + f_5 \lambda + f_6, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} f_4 &= 2c_1 c_3 + c_2^2 - \tilde{c}_2, \\ f_5 &= c_1 (c_3 - c_1 c_2) v^2 - 2c_1 \tilde{c}_1 v + 2c_2 c_3 - 2c_1 \tilde{c}_2, \\ f_6 &= c_1 (c_3 - c_1 c_2) v^2 - 2c_1^2 \tilde{c}_1 v + c_3^3 - \tilde{c}_1^2 - c_1^2 \tilde{c}_2. \end{aligned}$$

Если $c_1 \neq 0, c_3 = c_1 c_2, \tilde{c}_1 = 0$, то спектральная кривая задается уравнением

$$\mu^2 = (\lambda + c_1)^2 (\lambda^4 + 2c_2 \lambda^2 + c^2 - \tilde{c}_2),$$

а уравнение на функцию $v(x)$ имеет вид:

$$v_x^2 = v^4 + 4c_2 v^2 + 4\tilde{c}_2.$$

Аналогичный случай был рассмотрен в предыдущем разделе. Поэтому здесь мы его рассматривать не будем.

При $c_1 = c_3 = 0, \tilde{c}_1 \neq 0$ спектральная кривая задается уравнением

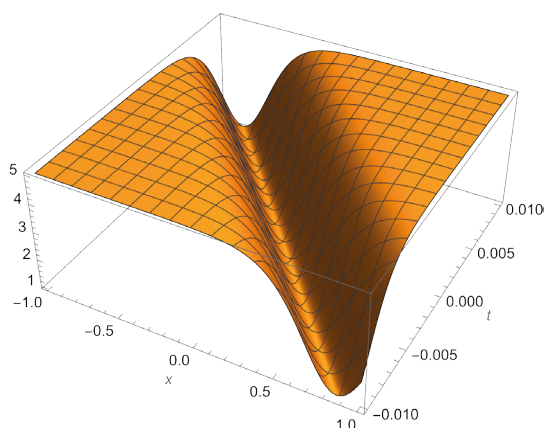
$$\mu^2 = \lambda^6 + 2c_2 \lambda^4 + (c_2^2 - \tilde{c}_2) \lambda^2 - \tilde{c}_1^2.$$

Решая автономное уравнение (18) при

$$\begin{aligned} c_2 &= -\frac{1}{2} (2 - 2b^2 + 3b^4) a^2, \quad \tilde{c}_1 = -(b^2 - 1)^2 (b^2 + 1) a^3, \\ \tilde{c}_2 &= -\frac{1}{4} (b^2 - 3) (3b^2 - 1) (b^2 + 1)^2 a^4, \quad a, b \in \mathbb{R}, \end{aligned}$$

имеем:

$$\begin{aligned} v(x, t_1, t_2, \dots) &= \frac{(3b^2 - 1) a \tanh^2(X) + b^2 (b^2 - 3) a}{\tanh^2(X) - b^2}, \\ X &= 2abx + \sum_{j \geq 1} m_j t_j, \end{aligned} \quad (19)$$



- *Рис. 3. Решение (19) при $a = -1, b = 2$*
- *Fig. 3. Solution (19) for $a = -1, b = 2$*

где

$$m_1 = 4a^3b(3 - 2b^2 + 3b^4),$$

$$m_2 = 4a^5b(15 - 20b^2 + 58b^4 - 20b^6 + 15b^8).$$

Нетрудно видеть, что данное решение не имеет особенностей при $b^2 > 1$.

Решение (19) модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза изображено на рис. 3. При $a = -1, b = 2$ оно имеет вид темного солитона.

Спектральная кривая, соответствующая решению (19), задается уравнением:

$$\mu^2 = (\lambda^2 - a^2(b^2 + 1)^2)(\lambda^2 - a^2(b^2 - 1)^2)^2. \quad (20)$$

Кратные корни многочлена, стоящего в правой части уравнения спектральной кривой, ука-

зывают на наличие в решении гиперболических функций. Поскольку из уравнения (20) нетрудно найти параметры решения с точностью до их знака, то в случае $n = 2$ восстановление решения по спектральной кривой происходит не однозначно.

В случае невырожденной спектральной кривой решение $v(x, t_1)$ модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза описывается рациональной функцией от эллиптического синуса. Поскольку выражения для параметров решения и самого решения довольно громоздки, то мы их опустим.

Заключительные замечания

Модифицированное уравнение Кортевега – де Фриза является одним из наиболее известных уравнений. Данное уравнение обладает замечательным свойством, которое заключается в том, что его решения с помощью преобразования Миуры (см., например, [13, 14]) могут быть переведены в решения обычного уравнения Кортевега – де Фриза [1–4, 13–15]. А поскольку есть связь между титульными решениями иерархий интегрируемых уравнений, то она должна быть и между последующими уравнениями иерархий. Соответственно, должна быть связь и между спектральными кривыми этих иерархий. Наши дальнейшие исследования по данной тематике будут посвящены установлению соответствий между уравнениями спектральных кривых модифицированного и обычного уравнений Кортевега – де Фриза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ablowitz M. J., Segur H. Solitons and the inverse scattering transform. Philadelphia: SIAM, 1981. 425 p.*
2. *Solitons and nonlinear wave equations / R. Dodd, J. C. Eilbeck, J. D. Gibbon, H. C. Morris. Academic Press, Inc., 1982. 648 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. *Theory of solitons / V. E. Zakharov, S. V. Manakov, S. P. Novikov, L. P. Pitaevskii. N. Y.: Plenum, 1984. 276 p.*
5. *Faddeev L. D., Takhtajan L. A. Hamiltonian methods in the theory of solitons. Springer, Springer Ser. classics in mathematics, 2007. 585 p.*
6. *Dubrovin B. A. Matrix finite-zone operators // J. soviet math. 1985. Vol. 28. P. 20–50.*
7. *Smirnov A. O. Spectral curves for the derivative nonlinear Schrödinger equations // Symmetry. 2021. Vol. 13, № 7. 1203.*
8. *Gerdjikov V. S., Smirnov A. O. On the elliptic null-phase solutions of the Kulish – Sklyanin model // Chaos, solitons and fractals. 2023. Vol. 166. 112994.*
9. *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.*
10. *Matveev V. B., Smirnov A. O. AKNS hierarchy, MRW solutions, Pn breathers, and beyond // J. math. phys. 2018. Vol. 59, № 9. 091419.*

11. *Akhiezer N. I.* Elements of the theory of elliptic functions. Providence, RI, American mathematical society, 1990. 292 p.
12. *Abramowitz M., Stegun I. A.* Handbook of mathematical functions with formulae, graphs and mathematical tables. N. Y.: Wiley-Interscience, 1972. 1045 p.
13. *Miura R.* Korteweg – de Vries equation and generalizations. I: A remarkable explicit nonlinear transformation // J. math. phys. 1968. Vol. 9. P. 1202–1204.
14. *Miura R., Gardner C., Kruskal M.* Korteweg – de Vries equation and generalizations. II: Existence of conservation laws and constants of motion // J. math. phys. 1968. Vol. 9. P. 1205–1209.
15. Method for solving the Korteweg – de Vries equation / C. S. Gardner, J. M. Greene, M. D. Kruskal, R. M. Miura // Phys. rev. lett. 1967. Vol. 19. P. 21095–21097.

REFERENCES

1. Ablowitz M. J., Segur H. Solitons and the inverse scattering transform. Philadelphia: SIAM; 1981. 425 p.
2. Dodd R., Eilbeck J. C., Gibbon J. D., Morris H. C. Solitons and nonlinear wave equations. Academic Press, Inc.; 1982. 648 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. Zakharov V. E., Manakov S. V., Novikov S. P., Pitaevskii L. P. Theory of solitons. N. Y.: Plenum; 1984. 276 p.
5. Faddeev L. D., Takhtajan L. A. Hamiltonian methods in the theory of solitons. Springer, Springer Ser. classics in mathematics; 2007. 585 p.
6. Dubrovin B. A. Matrix finite-zone operators. J. soviet math. 1985;28:20–50.
7. Smirnov A. O. Spectral curves for the derivative nonlinear Schrödinger equations. Symmetry. 2021;13(7):1203.
8. Gerdjikov V. S., Smirnov A. O. On the elliptic null-phase solutions of the Kulish – Sklyanin model. Chaos, solitons and fractals. 2023;166:112994.
9. Smirnov A. O., Caplieva A. A. Vector form of Kundu – Eckhaus equation and its simplest solutions. Ufa mathematical journal. 2023;15(3):146–163.
10. Matveev V. B., Smirnov A. O. AKNS hierarchy, MRW solutions, Pn breathers, and beyond. J. math. phys. 2018;59(9):091419.
11. *Akhiezer N. I.* Elements of the theory of elliptic functions. Providence, RI, American mathematical society; 1990. 292 p.
12. *Abramowitz M., Stegun I. A.* Handbook of mathematical functions with formulae, graphs and mathematical tables. N. Y.: Wiley-Interscience; 1972. 1045 p.
13. *Miura R.* Korteweg – de Vries equation and generalizations. I: A remarkable explicit nonlinear transformation. J. math. phys. 1968;9:1202–1204.
14. *Miura R., Gardner C., Kruskal M.* Korteweg – de Vries equation and generalizations. II: Existence of conservation laws and constants of motion. J. math. phys. 1968;9:1205–1209.
15. *Gardner C. S., Greene J. M., Kruskal M. D., Miura R. M.* Method for solving the Korteweg – de Vries equation. Phys. rev. lett. 1967;19:21095–21097.

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 20.09.2023

Поступила после рецензирования 20.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Received 20.09.2023

Revised 20.09.2023

Accepted 09.10.2023

Геоинформационное моделирование и искусственный интеллект

Марсель Равильевич Вагизов¹

✉ bars-tatarin@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4848-1619, SPIN-код: 4811-8943

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются возможности и перспективы интеграции технологии геоинформационного моделирования. Описываются преимущества применения каждой из технологий и возможности применения технологий при их интеграции. Приведены примеры отдельных компонент визуальных составляющих технологий геоинформационного моделирования. Описаны возможное развитие рассматриваемых технологий в обозримом будущем и их совместная интеграция.

Ключевые слова: искусственный интеллект, геоинформационное моделирование, инфокоммуникационные системы

Для цитирования: Вагизов М. Р. Геоинформационное моделирование и искусственный интеллект // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 56–60. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-56-60.

Original article

Geoinformation modeling and artificial intelligence

Marsel R. Vagizov¹

✉ bars-tatarin@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4848-1619, SPIN-code: 4811-8943

¹ Saint-Petersburg Forest Technical University named after S. M. Kirov, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the possibilities and prospects for integrating geographic information modeling technology. The advantages of using each technology separately and the possibility of using technologies when integrating them are described. Examples of individual components of each technology and their visual components are given. The possible development of these technologies in the near future is indicated.

Keywords: artificial intelligence, geoinformation modeling, infocommunication systems

For citation: Vagizov M. R. Geoinformation modeling and artificial intelligence. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):56–60. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-56-60.

Введение

В научных работах в области геоинформатики [1–3] широко освещаются технологии геоинформационного моделирования применительно к разным типам систем. С одной стороны, в такие задачи входит решение проблем развития территорий с учетом обозначенных факторов, к такому типу моделирования относятся:

- 1) моделирование урбанизированных территорий;
- 2) моделирование техногенных катастроф;
- 3) моделирование природных бедствий;
- 4) моделирование лесных экосистем;
- 5) моделирование развития инфокоммуникационных систем.

С другой стороны, очевиден стремительный рост технологий в области искусственного интеллекта (ИИ), который, по данным отчета «State of Ventury» [4], составлял 11 % в 2022 г., причем доля от 8 до 12 % сохраняется на протяжении уже ше-

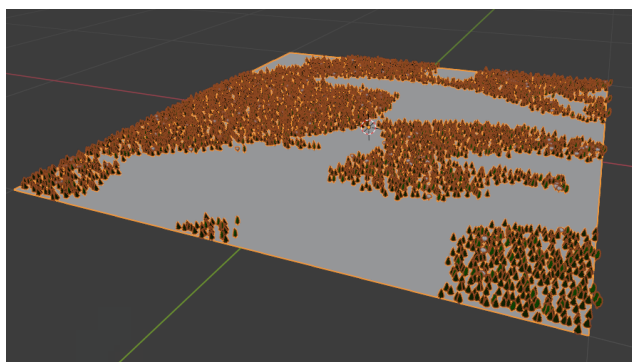
сти лет. Следовательно, обе технологии активно применяются в различных отраслях. В данной публикации предлагается рассмотреть возможность интеграции двух технологий – геоинформационного моделирования и технологий искусственного интеллекта, раскрыв преимущества и возможные пути их совместной интеграции, сферы применения и сценарии использования интегративной технологии.

Особенности применения технологий геоинформационного моделирования

В современные задачи управления любой территорией входит необходимость познания, какие объекты расположены на территории, из чего они состоят, каков их жизненный цикл, если речь идет об объектах биологического происхождения. Для разработки геоинформационных моделей используются различные программные продукты

(Autodesk 3D Max, QGIS, Blender GIS), как правило, здесь используются и 3D-технологии и геоинформационные технологии, включая технологии картографирования. Но помимо стандартных задач, пользователей и лиц, принимающих управленческие решения, всегда интересует вопрос, что будет с территорией в их подведомственном расположении или аренде, как она будет развиваться, какие ресурсы и сколько можно будет извлечь полезного материала с конкретно выбранного участка. Именно поэтому технологии геоинформационного моделирования позволяют строить прогноз, как будут со временем меняться территория, процесс, явление.

При проектировании поведения конкретного объекта мы заранее определяем контрольные точки – в каких направлениях и как изменяется объект, при этом, конечно, используется математический аппарат движения и анаморфирования геообъектов, анализируются статистические показатели. Например, в научной работе [5] математически описывается движение селевых потоков, одного из крупных стихийных бедствий. Технологии обработки данных на основе использования систем искусственного интеллекта, напротив, оперируют численной информацией, обработка которой призвана обеспечить расчет зависимостей, установление корреляционных связей или их отсутствие. Задача двух разделенных процессов – объединить гетерогенные данные, т. е. данные, которые получены разными техническими способами для разного представления. Такие данные имеют разную структуру и отличаются способом их конечного представления. Например, данные для геоинформационного моделирования представляют собой, как правило, пространственные объекты или группу объектов. Хорошо представленная группа моделируемых объектов может быть показана в виде геоинформационной модели лесного квартала (рис. 1).



• Рис. 1. Геоинформационная модель лесного квартала
• Fig. 1. Geoinformation model of forest quarter

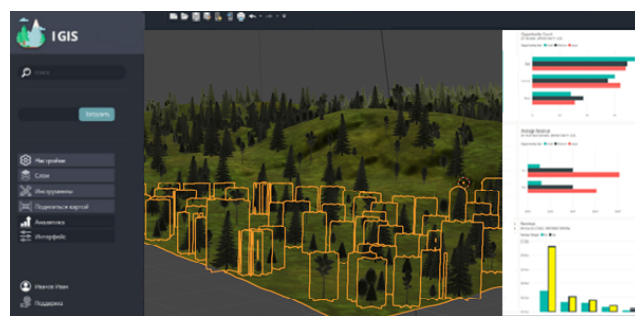
Например, при геоинформационном моделировании лесных экосистем мы получаем данные в виде трехмерных объектов, однако лес обладает и численной информацией, которая представлена, после комплекса мероприятий по ее сбору, таксации леса, в виде таблиц – таксационных описаний (рис. 2).

Такая информация, в виде таблиц с большим количеством наименований, сокращенных обозначений и профессионализмов, трудновосприимчива, и для ее усвоения требуется определенное изучение и исследование классических понятий в области лесных наук, что несколько усложняет взаимодействие специалистов из сферы информационных технологий со специалистами лесных направлений. Вне зависимости от способа представления данных, конечной составляющей представления данных для лица, принимающего решение, является их аналитическое преобразование в удобно воспринимаемую человеком форму, график, тренд, диаграмму и другие отображаемые характеристики, визуализирующие состояние объекта и его изменения с течением времени (рис. 3).

Постановка задачи интеграции двух технологий состоит в том, чтобы использовать инструментальное обеспечение геоинформационного моделирования, дополнив его такими технологиями, как анализ больших географических данных отдельными компонентами технологий искусствен-

2	7E	-	30	1	6	4	2	4	0.7	6	4	9
1.0	25	-	30	--	8	4	--	0C	---	1	---	
2005	10c	-	30	7	10	6	1	A5	6	1	-	
Единичные деревья												
8E	-140	7	19	20					4	3	1	
2B	-110	--	19	20					---	1	2	
			19						4			

• Рис. 2. Таксационная информация в виде набора данных txt-формата
• Fig. 2. Taxation information as a txt-format dataset



• Рис. 3. Одновременное отображение данных моделирования и анализа информации об объекте
• Fig. 3. Simultaneous display of modelling data and analysis of object information

ного интеллекта. При реализации данной технологии в работе над функциональной частью определенного программного обеспечения, например, при разработке «Интеллектуальной геоинформационной системы» (IGIS) [6], был использован интерактивный интерфейс, который позволяет обрабатывать статистическую информацию о геообъектах, интегрировать обработку пространственных данных библиотекой TensorFlow с библиотекой geopandas. Дополнительно возможно обеспечить программируемую связь между двумя и более типами разных объектов, расположенных в моделируемом пространстве, связав их семантически. Для этого используется организация соединения связей при помощи графических языков программирования, где формируется структура связей программных компонент, их теснота и степень влияния на другие компоненты, задаются условиями, при которых объект ведет себя тем или иным образом. В частности, данную технологию можно раскрыть на примере использования возобновления лесных ресурсов после лесных пожаров в виде построения модели, в которой инструменты искусственного интеллекта прогнозируют сценарии развития древостоя, а технологии геоинформационного моделирования

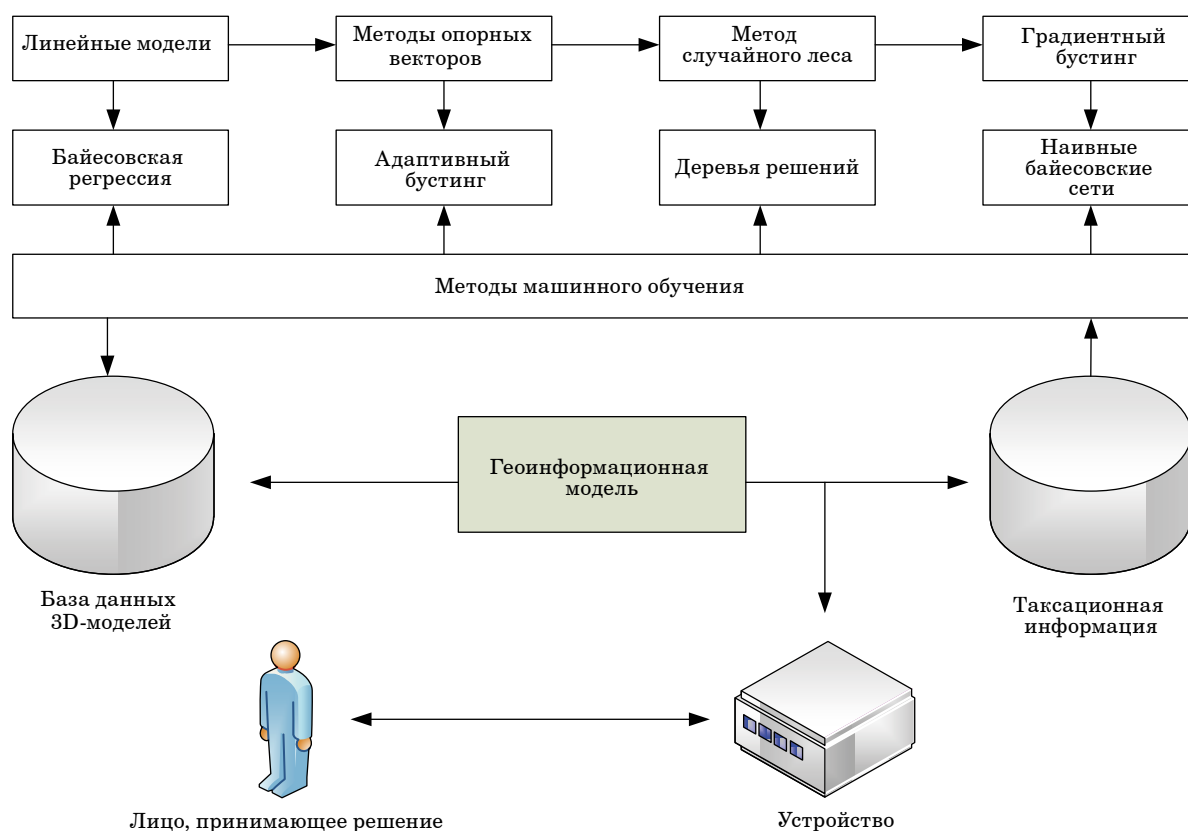
одновременно выводят моделируемый сценарий лицу, принимающему решения.

Технология геоинформационного моделирования обеспечивает визуальную составляющую обрабатываемой информации средствами искусственного интеллекта и отображает ее в виде аналитической информации. Таким образом, основными элементами, на базе которых происходит принятие решений, являются две составляющие – геоинформационная модель и подключенные к ней методы искусственного интеллекта обрабатываемых данных. К таким методам могут быть отнесены методы случайного леса, градиентный бустинг, линейные модели, интегрированные в состав геоинформационных систем и сред геоинформационного моделирования. Представить их положение и связь можно в виде структурной схемы (рис. 4).

Заключение

Можно отметить несколько положительных моментов отображения и использования такой технологии:

1) повышается уровень восприятия обрабатываемой информации;



• Рис. 4. Отображение различных технологий ИИ и геоинформационной модели
 • Fig. 4. Mapping of different AI-technologies and geoinformation model

2) сокращается время на выполнение действий, связанных с настраиванием системы обработки данных;

3) информация, выведенная таким способом, представляется комплексно;

4) уменьшается время на принятие решений.

В ближайшей перспективе данные технологии при их совместном использовании будут интегрироваться все больше в состав используемых традиционных геоинформационных систем и других программных продуктов, где необходимо оперировать сложноструктурированной пространственной информацией и строить прогнозы

на основе обработки географических, инфокоммуникационных и других типов данных. Такая обработка информации, как при решении ситуационных задач, так и при решении долгосрочного планирования, позволяет наиболее комплексно представить весь спектр собираемых данных в удобном для восприятия виде. Технологии искусственного интеллекта способны обеспечить анализ гораздо большего объема обработки геопространственной информации и при определении достоверного результата, оказывая поддержку при принятии управленческих решений по территории.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование трехмерной геоинформационной модели распространения лесного пожара / А. А. Гаврилюк, А. О. Бутусова, А. А. Кочерженко, М. Р. Вагизов // Информационные системы и технологии: теория и практика: сб. науч. тр. Вып. 15 / отв. ред. М. Р. Вагизов. СПб.: С.-петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, 2023. С. 30–37.
2. Иванов Е. Н., Силаев А. В. Геоинформационное моделирование основных этапов развития мерзлотных и ледниковых геосистем юга Восточной Сибири // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44, № 2. С. 198–209. Doi: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-198-209.
3. Юфев В. Г., Ткаченко Н. А. Геоинформационное моделирование и геостатистический анализ рельефа территории Республики Калмыкия // Науч.-агроном. журн. 2021. № 2 (113). С. 51–57. Doi: 10.34736/FNC.2021.113.2.008.
4. Отчет о состоянии венчурного бизнеса за 2022 г. URL: <https://www.cbinsights.com/research/report/venture-trends-2022/> (дата обращения: 06.09.2023).
5. Модели движения селевых потоков в природотехнических системах / А. А. Макаренко, А. Г. Карманов, Н. А. Карманова, Л. А. Винокуров // Цифровые технологии в лесном секторе: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. (СПб., 26–27 марта 2020 г.) / С.-петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова; С.-петерб. политехн. ун-т Петра Великого. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 96–99.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665369 Российская Федерация. Интеллектуальная геоинформационная система (IGIS) № 2023664113 / М. Р. Вагизов, К. А. Витлев, В. С. Челпанов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова». Заявл. 03.07.2023; опубли. 14.07.2023.

REFERENCES

1. Gavrilyuk A. A., Butusova A. O., Kocherzhenko A. A., Vagizov M. R. Design of a three-dimensional geoinformation model of the spread of forest fire. Information systems and technologies: theory and practice: Collection of scientific papers. Is. 5 / eds by M. R. Vagizov. SPb.: St. Petersburg State Forestry University named after S. M. Kirova; 2023, pp. 30–37. (In Russ.).
2. Ivanov E. N., Silaev A. V. Geoinformation modeling of the main stages of development of permafrost and glacial geosystems in the south of Eastern Siberia. Regional geosystems. 2020;44(2):198–209. (In Russ.) Doi: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-198-209.
3. Yuferev V. G., Tkachenko N. A. Geoinformation modeling and geostatistical analysis of the relief of the territory of the Republic of Kalmykia. Scientific-agronomic journal. 2021;(2(113)):51–57. (In Russ.) Doi: 10.34736/FNC.2021.113.2.008.
4. State of the venture business report. Available from: <https://www.cbinsights.com/research/report/venture-trends-2022/> [Accessed 6 September 2023].
5. Makarenko A. A., Karmanov A. G., Karmanova N. A., Vinokurov L. A. Models of the movement of mudflows in natural and technical systems. Digital technologies in the forest sector: materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference (SPb., 26–27 March); St. Petersburg State Forestry University named after S. M. Kirov; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. SPb.: Polytech-Press; 2020, pp. 96–99. (In Russ.).

6. Certificate of State Registration of Computer Programme no. 2023665369 Russian Federation. Intelligent geoinformation system (IGIS) / M. R. Vagizov, K. A. Vitlev, V. S. Chelpanov. Applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "S. M. Kirov St. Petersburg State Forest Engineering University". No. 2023664113; applied. 03.07.2023; published 14.07.2023. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Вагизов Марсель Равильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова.

Область научных интересов – технологии обработки информации, методы искусственного интеллекта, машинное обучение, геоинформатика, геоинформационное моделирование.

Поступила в редакцию 11.09.2023

Поступила после рецензирования 22.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Vagizov Marsel R., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Information Systems and Technologies, St. Petersburg Forest Technical University named after S. M. Kirov.

Research interests – information processing technologies, methods of artificial intelligence, machine learning, geoinformatics, geoinformation modelling.

Received 11.09.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 09.10.2023

Научная статья

УДК 004.932.2 + 658.562.3

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-61-65

Модульная структура системы управления характеристиками пены калийной флотомашины

Кристина Александровна Федосеева¹

✉ kristya_0103@mail.ru, SPIN-код: 6157-3274

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация. Предложена модульная структура информационной обработки данных об изменениях в ячейке калийной флотомашины по данным технического зрения, повышающая надежность и производительность системы сигнализации.

Ключевые слова: калийная промышленность, флотация, техническое зрение, управление

Для цитирования: Федосеева К. А. Модульная структура системы управления характеристиками пены калийной флотомашины // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 61–65. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-61-65.

Original article

Modular structure of a foam characteristics control system for potassium flotation machine

Kristina A. Fedoseeva¹

✉ kristya_0103@mail.ru, SPIN-code: 6157-3274

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Abstract. A modular structure for information processing of data on changes in a potassium flotation machine cell according to technical vision data has been proposed, increasing the reliability and performance of the alarm system.

Keywords: potash industry, flotation, technical vision, control

For citation: Fedoseeva K. A. Modular structure of a foam characteristics control system for potassium flotation machine. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):61–65. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-61-65.

Введение

В калийной промышленности управление флотацией осуществляется вручную человеком (флотатором), который принимает решения об оперативном управлении, основываясь на внешнем виде пены. Ее визуальные показатели (цвет, форма, размер пузырьков, текстура, толщина и вязкость) связаны с качеством конечного продукта в любом процессе с пенообразованием. Как правило, флотатор может непосредственно изменять только расход (но не состав) реагентов и расход пульпы [1]. Такой подход ставит качество готового продукта в зависимость от опыта флотатора, его знаний, периодичности осмотра пены в ячейках флотационной машины (ФМ). Разумеется, существуют рабочие инструкции, предписывающие, как именно действовать флотатору в той или иной ситуации во взаимосвязи с оператором пульта управления (ОПУ).

Однако успешное ведение процесса флотации в режиме реального времени все же базируется

на особенностях конкретного работника. Кроме того, некоторые характеристики готового продукта могут быть обнаружены только путем лабораторного анализа, т. е. через продолжительное время после наступления технологического отклонения. И нет гарантии, что именно ошибки флотатора привели к снижению качества продукции, а не отклонения на других переделах.

Таким образом, устранение или уменьшение влияния человеческого фактора на всех стадиях флотации калийной руды является важной и актуальной задачей.

Существующее состояние проблемы

Авторы работ [2–4] предлагают перейти от трудоемкого распознавания границ пузырьков к распознаванию бликов с их поверхностями при правильно организованном освещении пены. В своих статьях они сосредотачивались на распознавании параметров пены, однако не ставили

задачу определения начала переходного процесса. На практике флотатор, осматривая ячейку, приходит к выводу, что пена уже когда-то изменилась и надо принимать меры. Однако для постоянно работающей системы автоматического контроля вопрос идентификации начала переходного процесса, т. е. существенного отклонения от установившихся значений, становится первоочередным. Чем раньше такая идентификация будет произведена, тем быстрее можно привлечь внимание технолога, и тем быстрее он приведет процесс в норму. В момент, когда идентифицируется близкое к эталонному значение постоянной времени ячейки, эта информация предоставляется оператору, т. е. лицу, принимающему решения (ЛПР). Типовая архитектура подобного решения показана на рис. 1.

В работе [5] делается вывод, что такая система может увеличить эффективность поддержки принятия решений флотатором, в разных ситуациях, от 10 до 80 %.

Основной проблемой такой программной системы, работающей на одном персональном или промышленном компьютере, является высокая загрузка процессора во время выполнения операций:

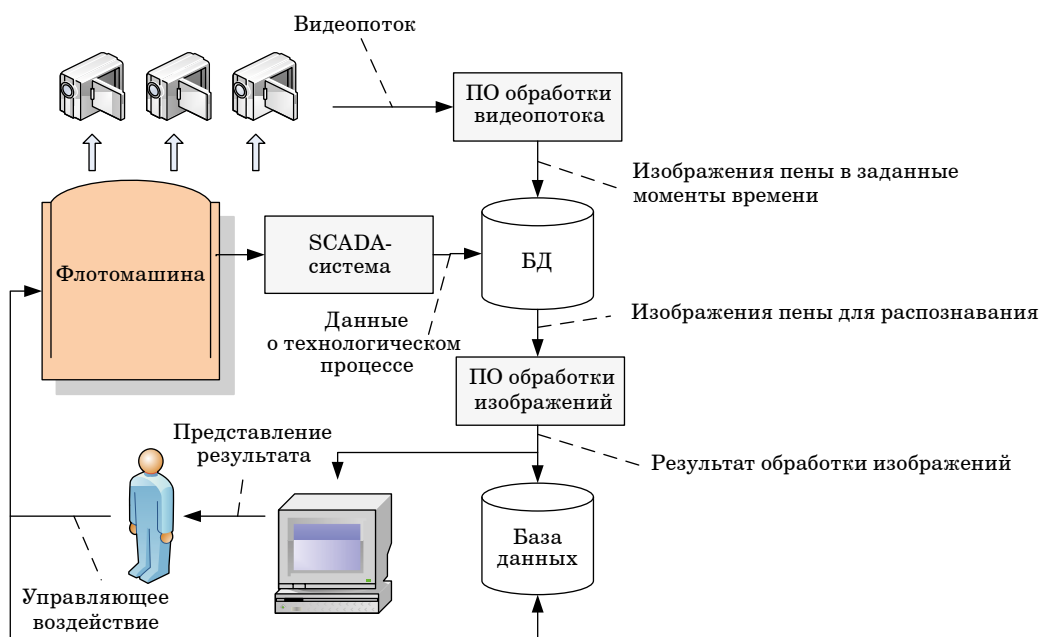
- 1) синхронизации;
- 2) выделения обрабатываемой части кадра (region of interests, ROI) (одной или нескольких, если обрабатывается несколько кадров подряд);
- 3) обесцвечивания и бинаризации каждого кадра;

4) вычисления статистических характеристик.

Вторая и третья операции выполняются функциями OpenCV. Первая и последняя операции выполняются оригинальным программным обеспечением (ПО), реализующим вышеописанные алгоритмы, но и в них используются функции OpenCV. При этом разные функции требуют предоставления им фрагмента изображения в разных внутренних форматах, что вынуждает также обращаться к функциям преобразования объемных графических данных.

Прямое распараллеливание кода, которое традиционно является механизмом ускорения подобных операций, в данном случае применить не удалось. Расположенные внутри `#pragma parallel` вызовы OpenCV приводят к периодическим сбоям (установлено экспериментально при попытке реализовать большое количество вариантов использования распараллеливания). Существуют параллельные решения внутри OpenCV с использованием программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений в составе видеокарт (compute unified device architecture, CUDA) или других аппаратных технологий, но в данном случае их использование малоэффективно, так как значительную часть вычислительной мощности потребляют алгоритмы предварительного преобразования данных или собственные алгоритмы.

Кроме того, вынужденное использование операционной системы (ОС) MS Windows может вызывать прерывания по инициативе операционной



• Рис. 1. Архитектура системы поддержки принятия решений флотатора в режиме подсказчика
 • Fig. 1. Architecture of a prompt mode decision support system for technologists

системы, а переход на какую-то ОС реального времени затруднителен, так как на них не реализована библиотека OpenCV. Даже на многоядерном процессоре эффект «торможения» ПО проявляется достаточно сильно, так как описанное в данной статье ПО без распараллеливания использует только одно ядро (как правило, из четырех). Одно ядро CPU работает для ОС в качестве аналога управляющей машины вычислительной системы. При подгрузке задач по инициативе ОС на оставшиеся два ядра «главное» ядро начинает тормозить обмен с «нашим» ядром, на котором работает ПО. В то же время *исключить* активность MS Windows в части ее внутренних действий невозможно, особенно начиная с Windows 10.

Модульная структура программного обеспечения

Следовательно, встает технический вопрос обеспечения надежности автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), в составе которой работает наше ПО, путем снижения зависимости от перегрузок персонального компьютера (ПК), вызванных внутренней активностью операционной системы. Предлагается решить эту проблему с использованием нескольких независимых ПК в составе программного комплекса (рис. 2).

В составе комплекса выделяют следующие модули:

1) модуль А – синхронизации, выделения кадра (или кадров при их последовательной обработке) и ROI из кадра;

2) модуль Б – предоставления данных по запросу;

3) комплект модулей В – обработки данных и формирования статистических характеристик и сигналов на их основе;

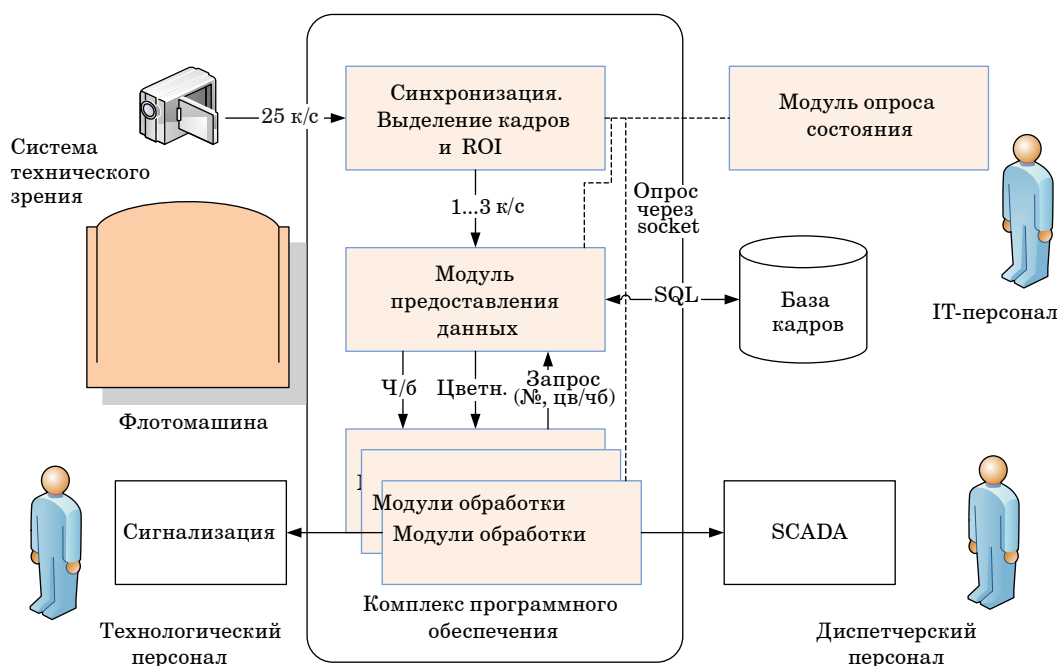
4) модуль опроса состояния.

Модуль А получает непосредственно видеопоток с камеры (25...30 fps). Главными задачами модуля, вызывающими его наибольшую загрузку, являются синхронизация с вращением пенгона, если он есть, выборка одного или нескольких последовательных кадров и вырезание ROI из них. Результат, теперь уже со скоростью 1...3 fps, передается модулю Б. Технически передача может быть осуществлена или через сокет, или через временную общую разделяемую память (SSD-накопитель малой емкости, физически расположенный на ПК, где работает модуль Б). Модуль Б, с точки зрения модуля А, находится в состоянии ожидания кадров и принимает их немедленно. Кроме этого, он выполняет еще две задачи:

1) обеспечивает сохранение поступивших кадров в постоянное хранилище (например, с использованием SQL-сервера);

2) выдает кадр или набор кадров по запросу модулям В.

Модули В отдельно обрабатывают бинаризованное изображение и цветное изображение.



• Рис. 2. Проект модульного устройства комплекса программного обеспечения
 • Fig. 2. Project of a modular software complex

Следовательно, со стороны модулей В к модулю Б могут поступать запросы вида:

{Тип, Количество, Время},

где «Тип» – тип запрашиваемого кадра (цветной или бинаризованный); «Количество» – количество подряд запрашиваемых кадров (реально будет возвращено кадров не более, чем их поступило в одном пакете от модуля А); «Время» – момент времени, после которого требуется следующая выдача. В качестве параметра «Время» может быть передан специальный сигнал (0), означающий «выдать последний имеющийся пакет». Эта опция будет использоваться как правило, и именно результат ее обработки будет поступать в системы сигнализации или отображения. Однако для настройки системы могут понадобиться исторические выборки трендов, и тогда модуль Б будет обрабатывать низкоприоритетные запросы на выдачу по времени, понемногу формируя эти выборки.

Для выполнения запроса модуль Б выбирает необходимый кадр из базы изображений (или использует хранящийся в оперативной памяти пакет при поступлении запроса с «Время = 0»),

при необходимости выполняет его бинаризацию (включая определение расчетного уровня) и возвращает запрашивающему модулю. Технически передача может быть осуществлена через сокет.

Кроме того, вне данного программного комплекса реализуется отдельный модуль опроса состояния, периодически пытающийся открыть сокет в направлении каждого из модулей (А, Б, В). При ошибке открытия или превышении некоторого установленного времени «трехстороннего рукопожатия» ТСР-модуль опроса предпринимает действия, направленные на решение проблемы, например, привлечение внимания IT-персонала к проблеме.

Заключение

Предложенное архитектурное устройство системы поддержки принятия решений калийного флотатора на основе распознавания изображений пены в флотационной машине позволит снизить вероятность сбоев в программном комплексе. Некоторое увеличение времени обработки за счет многократной передачи данных будет компенсировано ростом производительности вычислений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беккер В. Ф. Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации. Т. 1: Производство калийных удобрений. Пермь: БФ ПНИПУ, 2012. 312 с.
2. Затонский А. В., Варламова С. А. Использование бликовых отражений для автоматического распознавания параметров пены при флотации калийных руд // Обогащение руд. 2016. № 2. С. 49–56.
3. Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды / А. В. Малышева, А. В. Затонский, С. А. Варламова, А. А. Мясников // Наукоедение: интернет-журнал. 2017. Т. 9, № 2. С. 87.
4. Логунова О. С., Шилов Р. Э., Леднов А. В. Методика и алгоритмы сегментации изображения пенного продукта флотации // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2018. Т. 9, № 1. С. 72–75.
5. Малышева А. В., Уфимцева В. Н. Поддержка принятия решений с использованием моделей объектов химико-технологических производств // Экономика и менеджмент систем управления. 2018. № 4.2. С. 292–300.

REFERENCES

1. Bekker V. F. Solving technological problems of existing production using control devices. Vol. 1: Production of potash fertilizers. Perm': BF PNIPU; 2012. 312 p. (In Russ.).
2. Zatonkiy A. V., Varlamova S. A. Use of reflection flare spots for automatic recognition of froth parameters in potassium ores flotation. Obogashhenie rud. 2016;(2):49–56. (In Russ.).
3. Malysheva A. V., Zatonkiy A. V., Varlamova S. A., Mjasnikov A. A. Using of video graphic information to clarify a dynamic stochastic model of the potassium ore flotation process. Naukovedenie: Internet-zhurnal. 2017;9(2):87. (In Russ.).
4. Logunova O. S., Shilov R. Je., Lednov A. V. Methods and algorithms for image segmentation of froth flotation product. Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija. 2018;9(1):72–75. (In Russ.).
5. Malysheva A.V., Ufimceva V.N. Decision support in chemical-technology enterprises based on mathematical models. Jekonomika i menedzhment sistem upravlenija. 2018;(4.2):292–300. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Федосеева Кристина Александровна, аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Область научных интересов – использование технического зрения в управлении химико-технологическими объектами.

Поступила в редакцию 12.09.2023

Поступила после рецензирования 22.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Fedoseeva Kristina A., Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University.

Research interests – using of technical vision in the chemical-technological devices control.

Received 12.09.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 09.10.2023

Влияние пандемии COVID-19 на степень употребления легальных нейростимулирующих веществ на примере Финляндии

Полина Андреевна Шаклеина¹

wpolina28@gmail.com, SPIN-код: 8367-4893

Елена Владимировна Измайлова¹

✉ izmaylova_ev@bk.ru, SPIN-код: 4051-5584

¹Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Березники, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается воздействие легальных нейростимулирующих веществ в период пандемии COVID-19 на жителей Финляндии. С использованием наборов перестановки частных критериев были проведены анализы, позволяющие оценить возможное влияние пандемии COVID-19 на употребление нейростимулирующих веществ. При этом были установлены оптимальные веса частных критериев, которые обеспечивают наибольшую плавность допустимой оценки. Это позволило построить модель оценки эффективности покупательской способности и прогнозировать ее изменения. Проведенные анализы и сравнение фактических и расчетных значений за период пандемии COVID-19 показали, что данный метод имеет высокую точность и позволяет получать достаточно хорошие результаты.

Ключевые слова: Финляндия, веса частных критериев, легальные нейростимулирующие вещества, постпрогноз, пандемия, COVID-19, модель оценки эффективности, модель

Для цитирования: Шаклеина П. А., Измайлова Е. В. Влияние пандемии COVID-19 на степень употребления легальных нейростимулирующих веществ на примере Финляндии // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 66–73. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-66-73.

Original article

Impact of the COVID-19 pandemic on the extent of exposure to legal neurostimulant substances using Finland as a case study

Polina A. Shakleina¹

wpolina28@gmail.com, SPIN-code: 8367-4893

Elena V. Izmaylova¹

✉ izmaylova_ev@bk.ru, SPIN-code: 4051-5584

¹Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University, Berezniki, Russian Federation

Abstract. This article examines the effects of legal neurostimulant substances during a pandemic on Finnish residents. Using permutation sets of private criteria, analyses were conducted to assess the possible impact of the COVID-19 pandemic on exposure to neurostimulant substances. In doing so, the optimal weights of the private criteria were established that provided the greatest smoothness of acceptable estimation. This made it possible to build a model for assessing the effectiveness of purchasing power and to predict its changes. The conducted analyses and comparison of actual and estimated values for the period of the COVID-19 pandemic showed that this method has high accuracy and allows obtaining quite good results.

Keywords: Finland, private criterion weights, legal neurostimulant substances, postforecast, pandemic, COVID-19, performance evaluation model, model

For citation: Shakleina P. A., Izmaylova E. V. Impact of the COVID-19 pandemic on the extent of exposure to legal neurostimulant substances using Finland as a case study. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):66–73. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-66-73.

Введение

Роль нейростимулирующих веществ в период пандемии COVID-19 является вопросом, который остается весьма актуальным. Согласно исследованиям, люди стали больше использовать легальные нейростимулирующие вещества, такие как кофе, алкоголь и некоторые наркотики

(новые психоактивные вещества, оборот которых еще не контролируется в рамках закона, а также ноотропные лекарства, немедицинское использование рецептурных лекарств и т. д.), в ответ на стрессовые ситуации, вызванные пандемией. Это может привести к серьезным последствиям для здоровья, особенно с учетом того, что многие из этих веществ могут иметь вред-

ное воздействие на функционирование мозга и другие органы.

Кроме того, пандемия COVID-19 также может усилить негативный эффект легальных нейростимулирующих веществ на здоровье, так как многие люди могут увеличить их потребление в ответ на неопределенность и тревогу, вызванные данной ситуацией. Повышенное потребление алкоголя и наркотиков также может ухудшить иммунную систему, увеличивая вероятность заражения COVID-19 и осложнений при его развитии.

Вредоносное воздействие легальных нейростимулирующих веществ в период пандемии заключается в том, что многие люди могут столкнуться с интенсивным воздействием веществ, которые могут оказать негативное влияние на их здоровье в условиях пандемии, когда важно поддерживать иммунную систему.

В ходе исследования мы проанализируем различные социально-экономические показатели, такие как уровень безработицы, уровень доходов, инфляция, эффективность и доступность государственного образования и т. д. Также будет проведена оценка изменения восприятия окружающей действительности жителей, исходя из различных социальных, психологических и культурных факторов.

Цель работы – выявить количественное определение влияния легальных нейростимулирующих веществ на жителей Финляндии в период пандемии COVID-19.

На основе модифицированного формализованного критерия производится подбор весов, чтобы достичь оптимального результата. Это позволяет учитывать все аспекты при оценке объектов и принимать более обоснованные и точные решения. Метод формализации критерия заключается в описании его в явном виде, с определением для него математической модели. Это позволяет установить четкие правила и критерии оценки объектов по данному критерию.

Далее, чтобы избежать субъективизма экспертов и непредсказуемости результатов при использовании линейной свертки весов, применяется гипотеза о максимальной плавности [1]. Эта гипотеза заключается в том, что критерии, которые изменяются в одном направлении, должны иметь пропорциональное влияние друг на друга. Это помогает устранить противоречия между критериями и улучшить качество принимаемых решений:

$$Y = \sum_{i=1}^N \alpha_i Y_i,$$

где $\alpha_i \geq 0$ – весовое значение показателя Y_i .

Необходимо найти оптимальный набор весовых коэффициентов, который обеспечивает наименьшую оценку. Для достижения этого минимизируем квадратичное отклонение погрешности аппроксимации при определении коэффициентов α_i :

$$S = \sum_j (Y_{j+1} - Y_j)^2 \rightarrow \min.$$

Для анализа влияния параметров на системы существуют различные типы факторных моделей, такие как линейные многофакторные модели (ЛММ), регрессионно-дифференциальные модели (РДМ), модели пространства состояний (МПС) и конечно-разностные модели (КРМ), каждая из которых имеет свои особенности.

Линейные многофакторные модели [2] позволяют проанализировать взаимодействие множества факторов и выявить основные, влияющие на переменные пространства состояний (ППС). Однако они не могут учитывать нелинейные зависимости, а также усложненные взаимодействия между факторами.

Регрессионно-дифференциальные модели [3] учитывают динамику изменения факторов. Эта модель позволяет получать более точные прогнозы, но требует наличия большого объема данных и учитывает только линейные зависимости.

Модели пространства состояний [4] также учитывают динамику изменения факторов, включая нелинейные взаимодействия. Однако эта модель может быть сложной для интерпретации.

Конечно-разностные модели [5] позволяют оценивать сложные системы, в которых много факторов и происходят нелинейные изменения. Однако эта модель может быть очень трудной для вычисления.

Несмотря на то, что на практике самым распространенным методом является РДМ, для данной работы были использованы другие модели, так как с их помощью можно достичь более точного прогнозирования. Поэтому для анализа были построены модели, основанные на полученных статистических данных, такие как ЛММ, МПС и КРМ.

Выбор модели зависит от особенностей ППС и цели исследования. Если необходимо оценить влияние нескольких факторов на ППС, то лучше использовать ЛММ. Если же необходимо учитывать динамику факторов, то лучше выбрать РДМ или МПС. В случае сложной динамики и нелинейных зависимостей между факторами следует использовать КРМ.

Линейная многофакторная модель является простой и широко применяемой, ее форма такова:

$$Y_{\text{расч}}(t_k) = a + \sum_{j=1}^p b_j X_j(t_k), \quad (1)$$

где a – свободный коэффициент; $X_j(t_k)$ – значения факторов, определяющих значение моделируемой величины; b_j – коэффициенты линейной множественной модели.

В работе описываются конечно-разностные модели первого и второго порядков, которые применяются для прогнозирования. Эти модели были созданы путем добавления авторегрессионных слагаемых первого и второго порядков в линейную многофакторную модель. Данные модели имеют следующий вид:

$$\frac{Y(t_k) - 2Y(t_{k-1}) + Y(t_{k-2}))}{\Delta t^2} \approx a + bY(t_{k-1}) + \sum_{i=1}^m c_i X_i(t_k) + d \frac{Y(t_{k-1}) - Y(t_{k-2}))}{\Delta t}, \quad (2)$$

где a – ускорение, характеризующее влияние второй производной по времени; b – коэффициент зависимости системы, отражающий влияние моделируемой величины $Y(t)$ на ее вторую производную; d – коэффициент сопротивления системы, характеризующий влияние производной моделируемой величины на ее вторую производную; c_i – коэффициент влияния внешних факторов.

После подстановки (1) в (2) получим:

$$Y(t_k) \approx Y_{\text{расч}}(t_k) = a + (b + d + 2)Y(t_{k-1}) - (1 + d)Y(t_{k-2}) + \sum c_i X_i(t_k),$$

где a – коэффициент, определяющий скорость для КРМ-1, ускорение изменения критерия для КРМ-2 при отсутствии каких-либо воздействий; b – зависимость системы от достигнутого состояния; c – влияние внешних факторов на систему; d – сопротивление системы.

Модели для прогнозирования влияния пандемии COVID-19 на употребление легальных нейростимулирующих веществ на примере Финляндии

Сначала требуется произвести сбор данных о потреблении легальных нейростимулирующих веществ в Финляндии. Для этого можно использовать статистические данные, предоставляемые [6], например, данные о продаже алкоголя, чая, кофе и т. д.

В целом для сбора данных о потреблении легальных и нелегальных нейростимулирующих веществ в Финляндии мы можем использовать

различные источники, такие как данные аптек, опросы населения и научные исследования.

Собрав все данные, можно построить модель прогнозирования и использовать ее для принятия решений. Воспользуемся таблицей в MS Excel, с помощью которой можно определить потребление нейростимулирующих веществ, учитывая влияние различных параметров на ее эффективность.

Таблица в MS Excel содержит данные, которые показывают, какие параметры оказывают наибольшее влияние на покупку. Для этого был применен метод подбора весов с использованием мастера поиска решений, который позволяет получить наиболее плавное изменение оценки эффективности при изменении параметров. В табл. 1 указаны значения каждого параметра, их весовой коэффициент и влияние на эффективность потребления. Весовые коэффициенты определяются в процессе экспертного оценивания или с помощью математических моделей.

В качестве частных критериев выступают следующие:

Y_1 – лица в возрасте 20–64 лет, которые употребляют табачные изделия, %;

Y_2 – лица в возрасте от 15 лет, употреблявшие алкогольные напитки, %;

Y_3 – доля лиц, употреблявших те или иные наркотики, %;

Y_4 – потребление кофе на человека, кг/год;

Y_5 – потребление чая на человека, кг/год.

Статистические данные об уровнях частных критериев оценки покупательной способности жителей Финляндии в период с 2011 по 2021 г. приведены в табл. 1.

• *Таблица 1. Значения частных критериев с 2011 по 2021 г.*

• *Table 1. Values of partial criteria from 2011 to 2021*

Год	$Y_1, \%$	$Y_2, \%$	$Y_3, \%$	$Y_4, \text{кг/год}$	$Y_5, \text{кг/год}$
2011	27,0	11,60	17,0	9,70	1,27
2012	27,0	11,00	17,0	9,60	1,26
2013	26,0	11,00	19,0	10,00	1,26
2014	24,0	10,60	20,0	9,50	1,25
2015	25,0	10,30	22,0	9,90	1,15
2016	26,0	10,30	23,0	9,90	1,10
2017	26,0	10,00	23,0	9,60	1,07
2018	26,0	10,10	24,0	9,90	0,98
2019	25,0	9,80	24,0	9,90	0,99
2020	21,0	9,20	26,0	9,30	0,87
2021	20,0	9,00	28,0	9,40	0,88
2022	18,0	9,00	29,0	11,70	0,79

Для выполнения сравнения результатов прогнозов моделей ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 необходимо:

1) оценить качество прогнозов каждой модели на основе реальных данных. Для этого необходимо сравнить значения прогнозов каждой модели с фактическими значениями данных за определенный период времени;

2) сопоставить результаты оценки качества прогнозов каждой модели. Необходимо выбрать модель, которая показала наилучшее качество прогнозов;

3) использовать выбранную модель для составления прогноза на период пандемии COVID-19.

Выполнение этих шагов поможет выбрать наилучший вариант модели и получить точный прогноз на будущее.

Однако следует отметить, что любое решение проблемы оценки деятельности подразумевает определенный уровень субъективизма, поскольку любое формализованное решение основывается на субъективных выборах и оценках специалистов в конкретной области знаний [7]. Необходимо стремиться к минимизации влияния субъективных факторов, но полностью избавиться от них невозможно.

В качестве внешних факторов были выбраны следующие показатели:

X_1 – уровень потребления алкоголя в Финляндии, л;

X_2 – уровень безработицы в Финляндии, %;

X_3 – уровень инфляции в Финляндии, %;

X_4 – уровень религиозности в Финляндии, %;

X_5 – индекс стоимости жизни в Финляндии;

X_6 – глобальный индекс миролюбия в Финляндии;

X_7 – индекс уровня образования населения в Финляндии;

X_8 – уровень медицинского обслуживания в Финляндии, %.

Статистические данные внешних факторов [8–13], которые влияют на систему, в период с 2011 по 2021 г. приведены в табл. 2.

Далее для каждого показателя определяем его вклад в развитие системы. Это поможет определить наиболее критические моменты и разработать эффективные меры по их устранению. Важно помнить, что показатели являются не самоцелью, а лишь инструментом для управления системой.

Размерности данных различаются, поэтому необходимо произвести нормализацию перед дальнейшей обработкой. Для этого была использована следующая формула:

$$\tilde{Y}_{ij} = \frac{Y_{ij} - \min_j Y_{ij}}{\max_j Y_{ij} - \min_j Y_{ij}},$$

где $\tilde{Y}_{ij} \in [0,1]$ – нормированное значение i -го частного критерия в j -м году; Y_{ij} – исходное значение i -го частного критерия в j -м году.

После проведения расчетов с помощью функций MS Excel по поиску решений были получены весовые коэффициенты (табл. 3).

Весовые коэффициенты используются для учета значимости каждого из факторов в выборке. Каждый коэффициент может принимать значение от 0 до 1, где «1» означает максимальную значимость, а «0» – полное отсутствие влияния на выборку.

Употребление табачных изделий может негативно повлиять на здоровье человека и может иметь различные последствия для здоровья: чем больше потребление, тем больше рисков (Y_1).

- Таблица 2. Статистические данные внешних факторов с 2011 по 2021 г.
- Table 2. Externalities statistics from 2011 to 2021

Показатель	Год										
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
X_1 , л	12,7	12,6	12,58	12,52	11,8	11,1	10,9	10,7	10,45	10,23	10,11
X_2 , %	7,9	7,8	8,3	8,8	9,6	9,0	8,8	7,4	6,7	7,8	7,6
X_3 , %	3,3	3,2	2,2	1,2	-0,2	0,4	0,8	1,2	1,1	0,4	2,1
X_4 , %	0,77	0,76	0,75	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,80	0,81	0,81
X_5	71,75	71,81	71,97	72,11	71,88	72,21	72,65	72,73	72,18	72,71	72,98
X_6	1,352	1,348	1,297	1,297	1,277	1,429	1,515	1,506	1,488	1,404	1,402
X_7	0,873	0,88	0,815	0,826	0,834	0,841	0,847	0,887	0,894	0,898	0,951
X_8 , %	54,8	54,6	53,3	52,8	50,7	51,1	52,5	54,7	63,8	70,2	76,4

- Таблица 3. Значения весовых коэффициентов частных критериев
- Table 3. Values of weighting coefficients of private criteria

Критерий	Значение весового коэффициента критерия
Y_1	0,901559
Y_2	0,24582
Y_3	0,785263
Y_4	-0,62844
Y_5	0,805812

Чрезмерное употребление алкоголя может увеличивать риски возникновения многих заболеваний. Однако умеренное употребление алкоголя может иметь благоприятные эффекты (Y_2).

Зависимость от наркотиков может негативно сказаться на организме и привести к тяжелым заболеваниям и смерти (Y_3).

Потребление кофе может повышать риск развития многих заболеваний, но употребление кофе в умеренных количествах положительно влияет на центральную нервную систему – улучшает настроение, повышает физическую и умственную активность (Y_4).

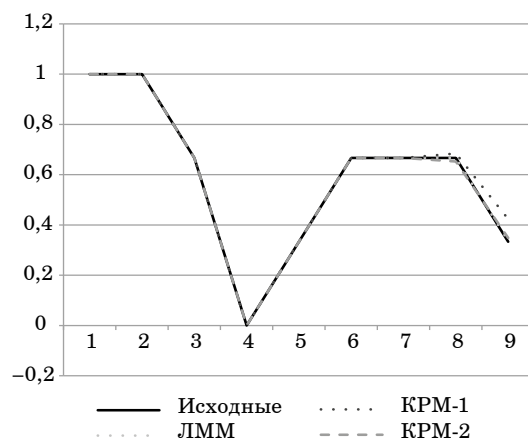
Регулярное употребление чая помогает нормализовать работу обменных процессов в организме, ускорить процесс расщепления жиров, но чай, как и любой другой напиток, может иметь отрицательные последствия при употреблении в больших количествах (Y_5).

Далее мы построим модели КРМ и ЛММ, проверим и сравним их точность прогнозирования, а также будем сравнивать прогнозы на 2020 и 2021 г. с реальными значениями. В модели включены годовые ряды критериев для оценки влияния нейростимулирующих веществ, полученные за период с 2011 по 2021 г.

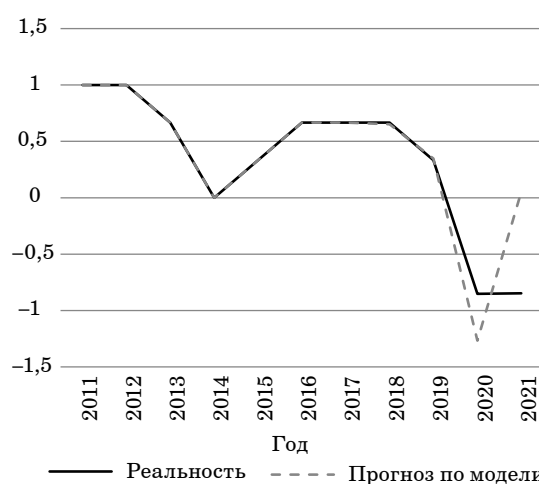
Для создания модели мы используем данные за период с 2011 по 2019 г., когда пандемия COVID-19 не оказывала влияния на объект. После нахождения коэффициентов были построены графики для различных видов факторных моделей (рис. 1).

Мы сравниваем модель, которую получили, а затем составляем прогноз на 2020–2021 гг. и строим соответствующий график на основе полученных результатов. С использованием КРМ-2 был составлен график (рис. 2), отражающий разницу между фактическими и спрогнозированными данными на 2020 и 2021 г.

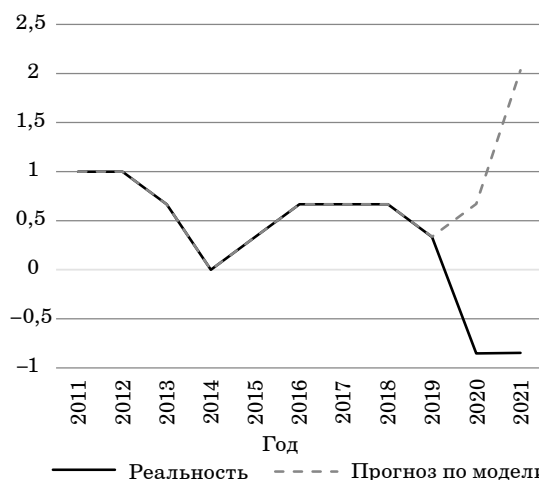
Теперь используем модель ЛММ, с помощью которой был составлен график (рис. 3), отража-



- Рис. 1. Постпрогноз на два года
- Fig. 1. Postforecast for two years



- Рис. 2. Сравнение фактических данных с данными по модели КРМ-2
- Fig. 2. Comparison of actual data with data from the CRM-2 model



- Рис. 3. Сравнение фактических данных с данными по модели ЛММ
- Fig. 3. Comparison of actual data with LMM model data

ющий разницу между фактическими и спрогнозированными данными на 2020 и 2021 г.

В результате работы были определены конкретные критерии модели и внешние факторы, которые могут влиять на систему. Для оценки этих критериев были использованы значения весовых коэффициентов, которые преобразовали частные оценки в общую. На основе этих оценок и внешних факторов были построены модели ЛММ и КРМ первого и второго порядков. С помощью этих моделей был сделан прогноз системы для 2020 и 2021 г. Для уточнения прогноза были проведены сравнения с реальными значениями потребления нейростимулирующих веществ за прошлые годы и с данными других экспертов в данной области.

Судя по графикам, модель КРМ-2 более точно соответствует исходным данным, чем ЛММ. График линейной многофакторной модели в данном случае сильно отличается от фактических данных. К сожалению, ЛММ-модели не могут описать все возможные виды зависимостей между переменными, так как линейные многофакторные модели базируются на предположении о линейности зависимости между независимыми и зависимыми переменными. Если это предположение не выполняется, то точность модели может быть низкой. Также, наряду с линейными зависимостями между переменными, может существовать очень сложная зависимость, которую линейная модель не может описать.

Однако невозможно утверждать, что конечно-разностные модели лучше линейных многофакторных моделей, или наоборот. Лучший выбор модели зависит от целей и характера данных, которые необходимо анализировать. Важно выбрать подходящую модель, чтобы получить правильную интерпретацию результатов и принять правильное решение на основе анализа данных.

Из результатов полученного графика КРМ-2 можно сделать вывод, что в условиях отсутствия пандемии было бы еще некоторое понижение потребления нейростимулирующих веществ, но позже потребление снова увеличилось бы, однако влияние пандемии COVID-19 привело к обратному. Из графика, приведенного на рис. 2, видно, что реальное потребление указанных веществ в 2020 г. было на 32 % выше, чем прогнозное значение, а в 2021 г. значения отличались на 105 %, где реальное потребление гораздо ниже прогнозируемого.

Это означает, что пандемия COVID-19 в целом достаточно положительно отразилась на жителях Финляндии, так как потребление нейростимулирующих веществ, таких как алкоголь, наркотики и табак, снизилось. Возможно, это произошло в связи с ограничениями на перемещение и общение в общественных местах, многие люди стали ограничивать свое потребление алкоголя, чтобы не подрывать свое здоровье и не ухудшать иммунную систему. Также наблюдалось снижение спроса на наркотики, так как карантин и закрытие границ привели к ограничению доступа к незаконным источникам снабжения. Для многих людей период пандемии COVID-19 стал временем распрощаться с вредными привычками и начать заботиться о своем здоровье и благополучии.

Заключение

Пандемия COVID-19 могла бы более отрицательно повлиять на поведение лиц, которые уже употребляют нейростимулирующие вещества, могла стимулировать потребление алкоголя, табака и других веществ из-за стресса и нервного напряжения, вызванных различными социальными и экономическими последствиями пандемии. Однако эти предположения требуют подтверждения дополнительными исследованиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Янченко Т. В., Затонский А. В. Определение оптимальной ранжировки частных критериев оценки краевого социального ресурса // Экономика и менеджмент систем управления. 2013. № 4 (10). С. 99–104.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 351 с.
3. Затонский А. В., Сиротина Н. А. Преимущества дифференциальной модели сложной экономической системы // Образование. Наука. Научные кадры. 2012. № 8. С. 98–102.
4. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. М.: Наука, 1970. 620 с.
5. Затонский А. В., Сиротина Н. А. Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка // Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22, № 2. С. 96–106. Doi: 10.14529/ctcr220209.
6. Statistics Finland. URL: <https://stat.fi/> (дата обращения: 15.09.2023).
7. Сиротина Н. А. Моделирование экономических аспектов использования регионального природно-ресурсного потенциала: дисс. ... канд. техн. наук. Пермь, 2022. 173 с.

8. Уровень безработицы в Финляндии. URL: <https://svspb.net/danmark/bezrobotica.php?l=finljandija> (дата обращения: 15.09.2023).
9. Уровень инфляции в Финляндии. URL: <https://svspb.net/danmark/infljacija.php?l=finljandija> (дата обращения: 15.09.2023).
10. STATISTIKRAPPORT 40/2022, Tobaksstatistik 2021. URL: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/145470/Tobaksstatistik2021_f%c3%b6rstasida%2btabellbilagor.pdf?sequence=6&isAllowed=y (дата обращения: 15.09.2023).
11. TILASTORAPORTTI 20/2023, Alkoholijuomien kulutus 2022. URL: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/146542/Alkoholijuomien%20kulutus%202022%20%28tilastoraportti%2020_2023%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 15.09.2023).
12. TILASTORAPORTTI, Suomalaisten huumeiden käyttö ja huumeasenteet 2022. URL: <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/146435/Suomalaisten%20huumeiden%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20ja%20huumeasenteet%202022.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 15.09.2023).
13. Глобальный индекс миролюбия (Global Peace Index). URL: <https://nonews.co/directory/lists/countries/global-peace-index>, (дата обращения: 15.09.2023).

REFERENCES

1. Janchenko T. V., Zatonckij A. V. Determination of the optimal ranking of private criteria for assessing the regional social resource. *Jekonomika i menedzhment sistem upravlenija*. 2013;10(4):99–104. (In Russ.).
2. Drejper N., Smit G. Applied regression analysis. Moscow: Statistics; 1973. 351 p. (In Russ.).
3. Zatonckij A. V., Sirotina N. A. Advantages of the differential model of a complex economic system. *Obrazovanie. Nauka. Nauchnye kadry*. 2012;(8):98–102. (In Russ.).
4. Derusso P., Roj R., Klouz Ch. State space in control theory. Moscow: Science; 1970. 620 p. (In Russ.).
5. Zatonckij A. V., Sirotina N. A. Management of the natural resource potential of the Perm region on the basis of a second-order finite-difference model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Computer technologies, automatic control, radio electronics*. 2022;22(2):96–106. (In Russ.). Doi: 10.14529/cter220209.
6. Statistics Finland. Available from: <https://stat.fi/> [Accessed 15 September 2023].
7. Sirotina N. A. Modeling of economic aspects of regional natural resource potential usage: dissertation. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2022. 173 p. (In Russ.).
8. Unemployment rate in Finland. Available from: <https://svspb.net/danmark/bezrobotica.php?l=finljandija> [Accessed 15 September 2023].
9. Inflation rate in Finland. Available from: <https://svspb.net/danmark/infljacija.php?l=finljandija> [Accessed 15 September 2023].
10. STATISTIKRAPPORT 40/2022, Tobaksstatistik 2021. Available from: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/145470/Tobaksstatistik2021_f%c3%b6rstasida%2btabellbilagor.pdf?sequence=6&isAllowed=y [Accessed 15 September 2023].
11. TILASTORAPORTTI 20/2023, Alkoholijuomien kulutus 2022. Available from: https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/146542/Alkoholijuomien%20kulutus%202022%20%28tilastoraportti%2020_2023%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 15 September 2023].
12. TILASTORAPORTTI, Suomalaisten huumeiden käyttö ja huumeasenteet 2022. Available from: <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/146435/Suomalaisten%20huumeiden%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20ja%20huumeasenteet%202022.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 15 September 2023].
13. Global peace index. Available from: <https://nonews.co/directory/lists/countries/global-peace-index> [Accessed 15 September 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шаклеина Полина Андреевна, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Область научных интересов – поддержка принятия решений по управлению социально-экономическими системами с использованием регрессионно-дифференциальных моделей.

Shakleina Polina A., Master Student at the Department of Process Automation, Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University.

Research interests – decision support for the management of social and economic systems using regression-differential models.

Измайлова Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Область научных интересов – поддержка принятия решений по управлению социально-экономическими системами.

Поступила в редакцию 25.09.2023

Поступила после рецензирования 30.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Izmaylova Elena V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Process Automation, Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University.

Research interests – decision support for the management of social and economic systems.

Received 25.09.2023

Revised 30.09.2023

Accepted 09.10.2023

Модельное исследование влияния пандемии COVID-19 на состояние железнодорожного транспорта Германии

Павел Владимирович Плехов¹

✉ onim@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-5025-9342, SPIN-код: 1577-2406

Виктория Александровна Чекулаева¹

vik-chekulaeva@yandex.ru, SPIN-код: 4154-5930

¹ Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Березники, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена определению влияния пандемии COVID-19 на состояние железнодорожного транспорта Федеративной Республики Германия. Конкретные критерии и факторы, влияющие на систему, были выбраны из общедоступных ежегодных статистических данных. Рассчитаны нормированные значения критериев и факторов. Построены линейная многофакторная и конечно-разностные модели первого и второго порядков. По наиболее адекватной модели получен прогноз изменения системы на период пандемии.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, COVID-19, моделирование, прогнозирование

Для цитирования: Плехов П. В., Чекулаева В. А. Модельное исследование влияния пандемии COVID-19 на состояние железнодорожного транспорта Германии // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 74–79. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-74-79.

Original article

Model study of the impact of the COVID-19 pandemic on the state of railway transport in Germany

Pavel V. Plekhov¹

✉ onim@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-5025-9342, SPIN-code: 1577-2406

Victoria A. Chekulaeva¹

vik-chekulaeva@yandex.ru, SPIN-code: 4154-5930

¹ Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University, Berezniki, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to determining the impact of Covid-19 pandemic on the state of railway transport in Germany. Specific criteria and factors influencing the system were selected from publicly available annual statistics. The normalized values of the criteria and factors were calculated. Linear multifactor and finite-difference models of the 1st and 2nd orders were constructed. Using the most adequate model, a forecast of changes in the system for the period of the pandemic was obtained.

Keywords: railway transport, COVID-19, modeling, forecasting

For citation: Plekhov P. V., Chekulaeva V. A. Model study of the impact of the COVID-19 pandemic on the state of railway transport in Germany. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(5):74–79. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-74-79.

Введение

Логистика является неотъемлемой частью современной мировой экономики. Для увеличения качества и количества перемещений необходимо развитие транспортной инфраструктуры. В зависимости от стран инфраструктура может включать в себя следующие типы транспорта: авиа-, железнодорожный, морской, автомобильный.

Рассмотрим состояние железнодорожного транспорта на примере Федеративной Республики Германия (ФРГ). Железнодорожный транспорт Германии имеет самую большую железно-

дорожную сеть в Центральной Европе. Общая протяженность железной дороги, по данным «Евростата» на 2021 г., составляет 39 799 км [1], из них электрифицировано более 61 %. Основным источником дохода железнодорожного транспорта является перевозка пассажиров и грузов. Ежегодно в Германии перевозится более 2 млрд пассажиров и 267,9 млн т грузов [2].

В 2019–2020 гг. в мире была объявлена пандемия COVID-19, которая нанесла сильнейший удар по экономике мира. Для защиты здоровья населения странам приходилось принимать меры в виде разных ограничений. Одно из глав-

ных ограничений состояло в том, что людям был установлен запрет в перемещении длительное время, и поэтому общественный транспорт, в том числе и самый распространенный – железнодорожный, был не востребован в течение длительного времени. Пандемия, вызванная COVID-19, привела к множеству проблем во всех сферах, как в Федеративной Республике Германия, так и в нашей стране. Это стало причиной исследования.

Целью данной исследовательской работы является прогнозирование влияния пандемии COVID-19 на состояние железнодорожного транспорта ФРГ, при котором была учтена динамика изменения различных социально-экономических показателей – численности и средних доходов населения, стоимости дизельного топлива, протяженности железных дорог, уровня электрификации, объемов грузовых перевозок, числа перевезенных пассажиров, курса евро к доллару, количества железнодорожного транспорта и авиаперевозок.

Материал и методы исследования

Одним из способов анализа социально-экономических систем является построение моделей. Например, в статье [3] с помощью концептуальной модели была рассмотрена структура тарифного регулирования на железнодорожном транспорте, а также рассмотрена классификация воздействий в области формирования тарифов.

Существуют различные виды моделей, например, такие как:

- линейные многофакторные модели (ЛММ) – оценивают влияние различных факторов на критерий [4];

- регрессионно-дифференциальные модели (РДМ) – имеют способность к точному прогнозированию, но необходим большой объем данных [5];

- модели в пространстве состояний (МПС) – показывают зависимость от состояния внешней среды [6];

- конечно-разностные модели (КРМ) – позволяют получить более качественные прогнозы [7].

Для достижения цели исследования использовали такие модели, как ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2. ЛММ выбрана, так как она является простой и понятной, а также часто используемой в прогнозировании социально-экономических систем. Однако, поскольку большинство показателей являются динамичными, необходимо применять нелинейные методы оценки, такие как КРМ.

Формула для линейной многофакторной модели:

$$Y_{\text{расч}}(t) = a_0 + \sum a_i x_i(t), \quad (1)$$

где a_0 – независимый коэффициент; Y_i – коэффициенты, которые показывают влияние факторов $x_i(t)$ на критерий в момент времени (номер года) t .

В статье [8] применяются конечно-разностные модели, формулы которых содержат авторегрессионные слагаемые первого и второго порядков и имеют следующий вид:

$$Y_{\text{расч}}(t_k) = a + bY(t_{k-1}) + \sum_i^m c_i X_i(t_k); \quad (2)$$

$$Y_{\text{расч}}(t_k) = a + bY(t_{k-1}) + dY(t_{k-2}) + \sum_{i=1}^m c_i X_i(t). \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) представляют собой конечно-разностные модели первого и второго порядка соответственно, где $Y_{\text{расч}}(t_k)$ – моделируемая величина в момент времени t_k ; $Y(t_{k-1})$ – величина, предшествующая на единицу; $Y(t_{k-2})$ – величина, предшествующая на две единицы (перед предыдущим); a – коэффициент скорости КРМ-1, ускорение изменения критерия КРМ-2 при отсутствии каких-либо воздействий; b – зависимость системы от достигнутого состояния; m – число факторов; c – влияние внешних факторов на систему; d – сопротивление системы.

Для построения моделей сначала необходимо найти ежегодные статистические данные исследуемого объекта. Для этого использовали официальный сайт Европейского союза «Евростат» [1]. Также использовали и другие различные источники поиска данных [9–13].

Для оценки качества исследования были предложены следующие частные критерии подмножества (Y_0), которые впоследствии помогли определить общий частный критерий: уровень загрузки железных дорог, поездов на 1 км (Y_1), уровень занятости железнодорожного транспорта, человек (Y_2), уровень прибыли в железнодорожном транспорте, млн евро (Y_3).

Все собранные статистические данные частных критериев с 2011 по 2021 г. приведены в табл. 1.

Также в качестве внешних факторов, влияющих на объект, были выбраны следующие X :

- X_1 – объем грузовых перевозок, тысяч тонн;

- X_2 – число перевезенных пассажиров, млн на пассажиро-километр;

- X_3 – протяженность железных дорог, км;

- X_4 – цены на дизельное топливо, евро;

- Таблица 1. Частные критерии оценки состояния железнодорожного транспорта ФРГ в 2011–2021 гг.
- Table 1. Private criteria for assessing the state of railway transport Germany from 2011 to 2021

<i>t</i>	Y_1	Y_2	Y_3
2011 г.	1051000	284319	37979000
2012 г.	1039000	287508	39296000
2013 г.	1035000	295653	39107000
2014 г.	1044000	295763	39728000
2015 г.	1054000	297202	40403000
2016 г.	1068000	306368	40557000
2017 г.	1073000	310935	42693000
2018 г.	1086000	318528	44065000
2019 г.	1090000	323994	44430000
2020 г.	1066000	322768	39901000
2021 г.	1096800	323640	43568000

- X_5 – уровень электрификации железных дорог, км;
- X_6 – численность населения, тысяч человек;
- X_7 – средние доходы населения, евро;
- X_8 – курс евро к доллару;
- X_9 – количество железнодорожного транспорта, шт.;
- X_{10} – число авиаперевозок, тысяч.

Найденные статистические данные представленных выше факторов, влияющих на состояние железнодорожного транспорта ФРГ с 2011 по 2021 г., приведены в табл. 2.

Все отобранные и приведенные выше показатели в той или иной степени оказывают влияние на нашу исследуемую систему.

- Таблица 2. Внешние факторы, влияющие на состояние железнодорожного транспорта ФРГ в 2011–2021 гг.
- Table 2. External factors affecting the state of railway transport Germany from 2011 to 2021

<i>t</i>	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
2011 г.	374737	89316	37960	1,43	20426	80327,9	2018	1,342139	1789	1021,9
2012 г.	366140	93918	37941	1,44	20500,8	80523,746	20730	1,292742	2096	985,669
2013 г.	373738	89450	37860	1,439	20575,6	80767,463	21153	1,331013	2404	954,874
2014 г.		90978	37775	1,193	20650,4	81197,537	21745	1,36671	2711	946,082
2015 г.	367314	91050	38466	1,048	20726	82175,684	22347	1,171861	3032	967,453
2016 г.	396326	95465	38623	1,211	20800,8	82521,653	22854	1,088695	3339	962,803
2017 г.	370722	95529	38594	1,201	20875,6	82792,351	23396	1,062448	3647	955,827
2018 г.	356299	98161	38416	1,22	20950,4	83019,213	24107	1,1956	3954	922,649
2019 г.	364120	100252	38394	1,359	21025,2	83166,711	24943	1,1438	4261	896,647
2020 г.	325303	57787	39773	1,21	21100	83155,031	25054	1,1207	4571	303,966
2021 г.	363646	57518	39799	1,585	21174,8	83237,124	26064	1,229	4878	586,134

Для начала необходимо рассчитать весовые коэффициенты, обеспечивающие плавность изменения выбранных критериев. Лучшими весами будут те, которые обеспечивают минимум оценки исследуемого объекта. Так, в статье [14] минимум оценки проводился по следующей формуле:

$$a_i : S = \sum_j (Y_{j+1} - Y_j)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Расчет весовых коэффициентов был произведен в MS Excel с помощью функции «Поиск решения». Полученные результаты приведены в табл. 3:

- 1) Y_1 – чем выше уровень загрузки железных дорог, тем лучше состояние железнодорожного транспорта;
- 2) Y_2 – уровень занятости железнодорожного транспорта приводит к стабильности его состояния;
- 3) Y_3 – повышение уровня прибыли в железнодорожном транспорте будет также положительно влиять и на состояние железнодорожного транспорта в целом.

Для исключения влияния размерности данных факторов, приведенных выше, необходимо нормировать их по формуле:

$$X_i(t) = \frac{X_i - \min(X_i(t))}{\max(X_i(t)) - \min(X_i(t))}, \quad (5)$$

где $X_i(t)$ – исходное значение i -го показателя в момент времени (t); $\min(X_i(t))$ – минимальное значение показателя; $\max(X_i(t))$ – максимальное значение показателя.

- Таблица 3. Значения весовых коэффициентов
- Table 3. Values of weight coefficients

Y_1	0,118698375
Y_2	1
Y_3	0,586077559

После проведенных расчетов и нормирования показателей можно построить модели ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 и сравнить, какая модель будет более точно прогнозировать. Для начала будем использовать данные с 2011 по 2019 г., чтобы посмотреть, как ведет себя система без влияния пандемии. А затем сравним прогноз на 2020 и 2021 г. с реальными значениями.

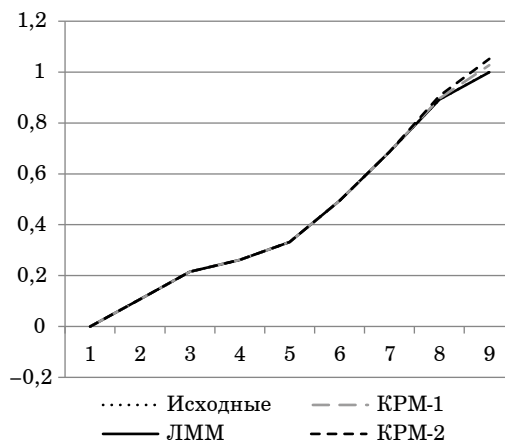
Результаты исследования и их обсуждение

Получившийся постпрогноз на 2020 и 2021 г. показан на рис. 1.

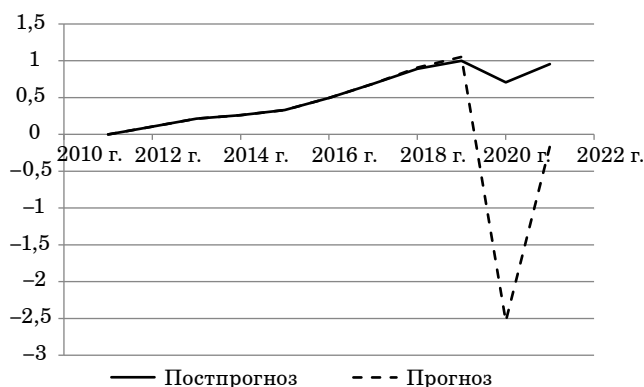
Из полученного постпрогноза можно сделать вывод, что график конечно-разностной модели второго порядка наиболее близок к исходным данным. Погрешности прогнозирования с использованием КРМ, как правило, значительно ниже, чем с использованием ЛММ. Поэтому для получения прогноза за 2020–2021 гг. будем использовать именно КРМ-2, чтобы сравнить с реальными исходными данными.

Полученный прогноз показан на рис. 2.

Из графика, показанного на рис. 2, можно сделать вывод, что разработанная система получила большой удар от наступления пандемии. Ухудшение состояния железнодорожного транспорта началось от точки А до точки Б. Выявлены ключевые факторы, которые повлияли на разработанную систему отрицательно. Например, объемы пассажирских перевозок упали на 90 %, что означает около 2 млрд евро недополученных доходов [15]. Грузовые перевозки сократились в значительно меньшей степени. В 2020 г. с 364 120 т снизились до 325 303 т, т. е. падение составило 12 %.



- Рис. 1. Постпрогноз на два года
- Fig. 1. Two-year post forecast



- Рис. 2. Сравнение постпрогноза по КРМ-2 и исходных данных прогноза
- Fig. 2. Comparison of the forecast finite-difference models no. 2

По показателям цен на дизельное топливо, наоборот, можно сказать о положительном влиянии пандемии, хоть и незначительном, так как в период с 2019 на 2020 г. его цена уменьшилась на 0,149 евро.

К наступлению 2021 г. состояние железнодорожного транспорта ФРГ заметно стало улучшаться (точка В на рис. 2), но пока точно не понятно, когда показатели вернуться к допандемийным значениям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Официальный сайт Европейского союза. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (дата обращения: 15.09.2023).
2. Железнодорожный транспорт в Германии. URL: <https://clck.ru/34qXdv> (дата обращения: 15.09.2023).
3. Моргунов В. М. Концептуальная модель регулирования тарифов на железнодорожном транспорте // Проблемы экономики и менеджмента. 2014. № 11 (39). С. 92–96.
4. Затонский А. В., Сиротина Н. А. Многофакторная модель сложной системы на основе дифференциального уравнения первого порядка // Вестн. КИГИТ. 2012. № 7 (25). С. 9–18.

5. *Затонский А. В., Янченко Т. В.* Метод управления развитием социального ресурса региона на основе регрессионно-дифференциального моделирования // *Управление большими системами: сб. тр.* 2015. № 54. С. 86–113.
6. Эконометрический ликбез: временные ряды. Введение в моделирование в пространстве состояний. URL: <http://quantile.ru/09/09-AT.pdf> (дата обращения: 15.09.2023).
7. *Затонский А. В., Сиротина Н. А.* Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка // *Образование. Наука. Научные кадры.* 2022. № 2. С. 96–106.
8. *Затонский А. В., Копотева А. В., Сиротина Н. А.* Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края // *Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.* 2021. Т. 21, № 2. С. 154–166.
9. Deutsche Bahn 2020 integrated report. URL: https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Englisch/2020e/Berichte/DB_IB20_e_web_01.pdf (дата обращения: 15.09.2023).
10. Deutsche Bahn integrated interim report. URL: https://www.dbcargo.com/resource/blob/8713442/eea4bbe0db83eb3f8d565eeb1354f592/Integrated-report-2022_en-data.pdf (дата обращения: 15.09.2023).
11. Транспорт Германии. URL: <https://www.ceicdata.com/en/germany/transportation> (дата обращения: 15.09.2023).
12. Евро-доллар: история курса валюты. URL: <https://ru.moneyratetoday.com/kotirovka-yevro-v-dollar-ssha.html> (дата обращения: 15.09.2023).
13. Средние зарплаты в Германии – по профессиям, сферам и регионам. URL: <https://www.tupa-germania.ru/rabota/srednjaja-zarplata-v-germanii.html#dinamica> (дата обращения: 15.09.2023).
14. *Янченко Т. В., Затонский А. В.* Определение оптимальной ранжировки частных критериев оценки краевого социального ресурса // *Экономика и менеджмент систем управления.* 2013. № 4. С. 99–104.
15. Противодействие влиянию пандемии COVID-19 на железнодорожный транспорт в мире. URL: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/RZD_june2020.pdf (дата обращения: 15.09.2023).

REFERENCES

1. Official website of the European Union. Available from: <https://ec.europa.eu/eurostat> [Accessed 15 September 2023].
2. Railway transport in Germany. Available from: <https://clck.ru/34qXdv> [Accessed 15 September 2023].
3. Morgunov V. M. Conceptual model for tariff regulation in railway transport. *Problems of economics and management.* 2014;(11(39)):92–96. (In Russ.).
4. Zatonsky A. V., Sirotnina N. A. A multifactor model of a complex system based on a first-order differential equation. *Bulletin of KIGIT.* 2012;(7(25)):9–18. (In Russ.).
5. Zatonsky A. V., Yanchenko T. V. A method for managing the development of a region's social resource based on regression-differential modeling. *Managing large systems: a collection of works.* 2015;(54):86–113. (In Russ.).
6. Econometric educational program: time series. Introduction to modeling in the state space. Available from: <http://quantile.ru/09/09-AT.pdf> [Accessed 15 September 2023].
7. Zatonsky A. V., Sirotnina N. A. Management of the natural resource potential of the Perm Region on the basis of a finite-difference model of the second order. *Education. The science. Scientific personnel.* 2022;(2):96–106. (In Russ.).
8. Zatonsky A. V., Kopoteva A. V., Sirotnina N. A. Application of finite-difference models for short-term forecasting of the natural resource potential of the Perm region. *Bulletin of SUSU. The series: Computer technologies, control, radio electronics.* 2021;21(2):154–166. (In Russ.).
9. Deutsche Bahn 2020 integrated report. Available from: https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Englisch/2020e/Berichte/DB_IB20_e_web_01.pdf [Accessed 15 September 2023].
10. Deutsche Bahn integrated interim report. Available from: https://www.dbcargo.com/resource/blob/8713442/eea4bbe0db83eb3f8d565eeb1354f592/Integrated-report-2022_en-data.pdf [Accessed 15 September 2023].
11. German transport. Available from: <https://www.ceicdata.com/en/germany/transportation> [Accessed 15 September 2023].
12. Euro-dollar: currency exchange rate history. Available from: <https://ru.moneyratetoday.com/kotirovka-yevro-v-dollar-ssha.html> [Accessed 15 September 2023].
13. Average salaries in Germany – by profession, sphere and region. Available from: <https://www.tupa-germania.ru/rabota/srednjaja-zarplata-v-germanii.html#dinamica> [Accessed 15 September 2023].
14. Yanchenko T. V., Zatonsky A. V. Determination of the optimal ranking of private criteria for assessing the regional social resource. *Economics and management of management systems.* 2013;(4):99–104. (In Russ.).
15. Countering the impact of the COVID-19 pandemic on rail transport in the world. Available from: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/RZD_june2020.pdf [Accessed 15 September 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Плехов Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Область научных интересов – поддержка принятия решений по управлению социально-техническими системами.

Чекулаева Виктория Александровна, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Область научных интересов – поддержка принятия решений по управлению социально-экономическими системами с использованием регрессионно-дифференциальных моделей.

Поступила в редакцию 27.09.2023

Поступила после рецензирования 30.09.2023

Принята к публикации 09.10.2023

Plekhov Pavel V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Process Automation, Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University.

Research interests – decision support for the management of social and technical systems.

Chekulaeva Victoria A., Master Student at the Department of Process Automation, Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University.

Research interests – decision support for the management of social and economic systems using regression-differential models.

Received 27.09.2023

Revised 30.09.2023

Accepted 09.10.2023

Совершенствование методов обращения с твердыми бытовыми отходами в Арктике с учетом климатических изменений

Наталья Александровна Жильникова¹

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

Елизавета Алексеевна Минкинен¹

✉ lisa.cross@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0981-4460, SPIN-код: 3676-5770

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

Аннотация. Глобальное изменение климата привело к увеличению среднего показателя температуры на Земле на 1 °C от показателей начала XX в. Анализ последних климатических трендов показывает, что это вызывает изменение эволюционно сложившейся природной экосистемы Арктики. В связи с этим привычные способы утилизации твердых бытовых отходов в Арктической зоне Российской Федерации могут оказаться неэффективными в условиях изменяющегося климата. В данной статье рассмотрены существующие методы утилизации отходов в Арктике. Представлен анализ последних климатических трендов. Введено понятие природно-технической геосистемы «полигон – окружающая среда». Предложена методика мониторинга природно-технической геосистемы и даны рекомендации по совершенствованию системы обращения с твердыми бытовыми отходами в условиях изменения климата Крайнего Севера.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, Арктика, климат, вечная мерзлота, глобальное изменение климата

Для цитирования: Жильникова Н. А., Минкинен Е. А. Совершенствование методов обращения с твердыми бытовыми отходами в Арктике с учетом климатических изменений // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 5. С. 80–90. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-80-90.

Original article

Improvement of waste disposal methods with regard to climate change in Arctic

Natalia A. Zhilnikova¹

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

Elizaveta A. Minkinen¹

✉ lisa.cross@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0981-4460, SPIN-code: 3676-5770

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

Abstract. Global climate change has already led to a 1°C increase in the average temperature of the planet from pre-industrial levels. An analysis of recent climate trends shows. This leads to changes in the evolutionarily established natural ecosystem of the Arctic. In this regard, the usual methods of solid waste disposal in the Arctic may be ineffective in a changing climate. This article reviews the available methods of municipal solid waste disposal. An analysis of recent climate trends is given. It offers recommendations for improving the MSW management system in a changing climate in the Arctic.

Keywords: municipal solid waste, Arctic, climate, permafrost, global climate change

For citation: Zhilnikova N. A., Minkinen E. A. Improvement of waste disposal methods with regard to climate change in Arctic. Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(5):80–90. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-5-80-90.

Введение

Одним из ключевых аспектов Указа Президента об основах государственной политики Российской Федерации (РФ) в Арктике до 2035 г. является освоение Арктических регионов. Успешное освоение не представляется возможным без учета изменения климатических особенностей.

Глобальное изменение климата является острой мировой проблемой. На протяжении сто-

летий в процессе эволюции на Земле формировались устойчивые биологические системы и экологическое равновесие. Таким образом, на планете образовались климатические пояса с относительными постоянными показателями – температурой, влажностью, количеством осадков, облачностью, преобладанием направления ветров и т. д. Однако за последние десятилетия антропогенная деятельность человека начала нарушать сложившийся баланс. В результате производственных

процессов техногенных объектов окружающая среда подверглась решительным физическому и химическому воздействиям, в том числе эмиссии парниковых газов и тепловому загрязнению.

Известно, что глобальное изменение климата привело к росту общего показателя температуры на Земле на 1 °С [1]. Исходя из оценки данных о климатической статистике в период с 1936 г. по 2018 г., можно заметить статистически значимый положительный линейный тренд среднегодовой температуры для территорий, находящихся на 60–70° и 70–85° с. ш. Это свидетельствует о том, что рост средней температуры на планете происходит быстрее именно на Севере – в Арктической зоне. Учитывая тот факт, что Арктика занимает приблизительно 28 % (около 5 млн км²) от общей сухопутной территории России, вопрос изменения климатических характеристик Российской Арктики является важным с экологической, экономической и социальной точек зрения.

В «Стратегии развития Арктической зоны РФ до 2035 года» указано, что скорость потепления климата в Арктике происходит быстрее в 2–2,5 раза, чем в целом на планете [2]. Следовательно, изменение характеристик этого региона происходит с той же скоростью. Существующие технологии утилизации бытовых отходов учитывают настоящие параметры окружающей среды – средней температуры, почвенного состава, жизни и ареалов биологических организмов, поэтому могут оказаться бесполезными и даже вредными для природной среды через пять, десять и более лет из-за изменившихся погодных условий.

Очевидно, что для реализации грамотной утилизации отходов в условиях изменяющегося климата Арктики необходимо проанализировать климатические особенности региона и внести поправки и рекомендации.

Анализ климатических трендов Арктического региона

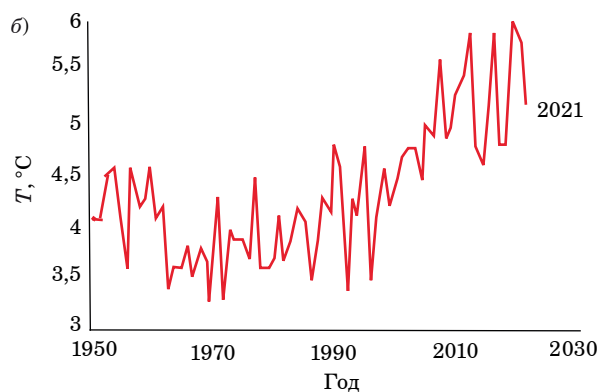
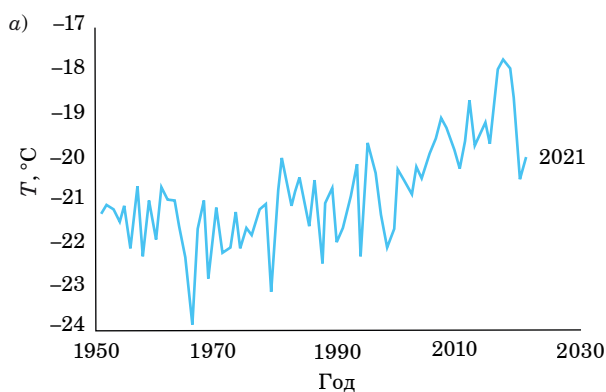
Согласно данным доклада Российской гидрометеорологической службы об особенностях климата за 2021 г., температура региона продолжает стремительно повышаться. К такому выводу ученые пришли на основе данных, снятых с 41 станции мониторинга Северного Ледовитого океана.

Анализ собранных данных показал, что с середины 1990-х гг. до начала 2021 г. отмечено существенное повышение полугодового показателя температуры (более чем на 4 °С, а летом – почти на 2,5 °С). График средних температур в период с 1950 г. по 2021 г. приведен на рис. 1.

Повышение средней температуры приводит к таянию ледников и вечной мерзлоты. С конца XX в. ледниковый покров Арктики начинает существенно сокращаться. График площади, открытой морским льдом, приведен на рис. 2.

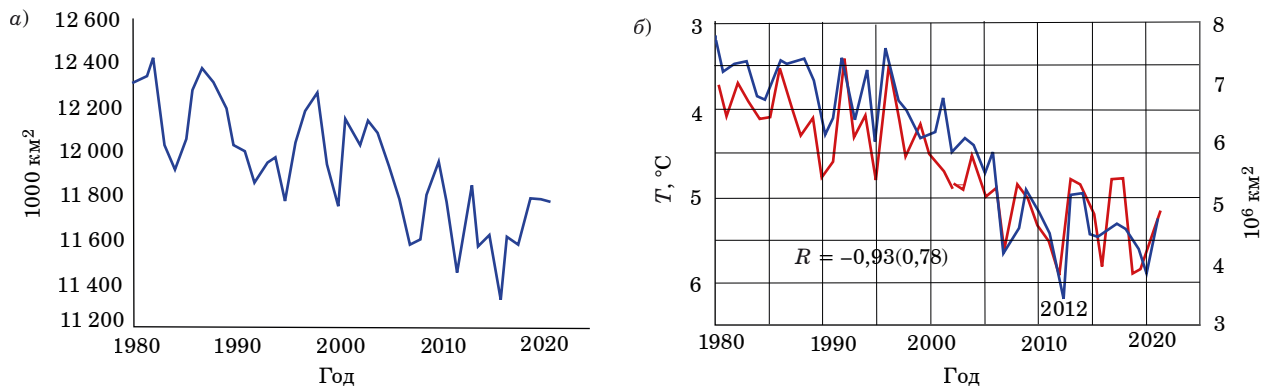
Одним из важных индикаторов климатических изменений в Арктике является деградация структуры вечной мерзлоты, а именно – снижение показателя мощности сезонно-талого слоя (СТС). СТС является индикатором состояния многолетнемерзлых грунтов. Исследования площади СТС проводятся с 1990 г. в рамках международной программы мониторинга «CALM» («CircumPolar Active-Layer Monitoring»). Оценка мощности СТС производится на 46 площадках и оценивается величиной глубины таяния слоя вечной мерзлоты в сантиметрах. На рис. 3 показан тренд мощности СТС для российской территории.

Тренды показывают, что за последние десятилетия происходит увеличение оттаивания вечной мерзлоты, что свидетельствует об изменении климата среды Арктического региона.

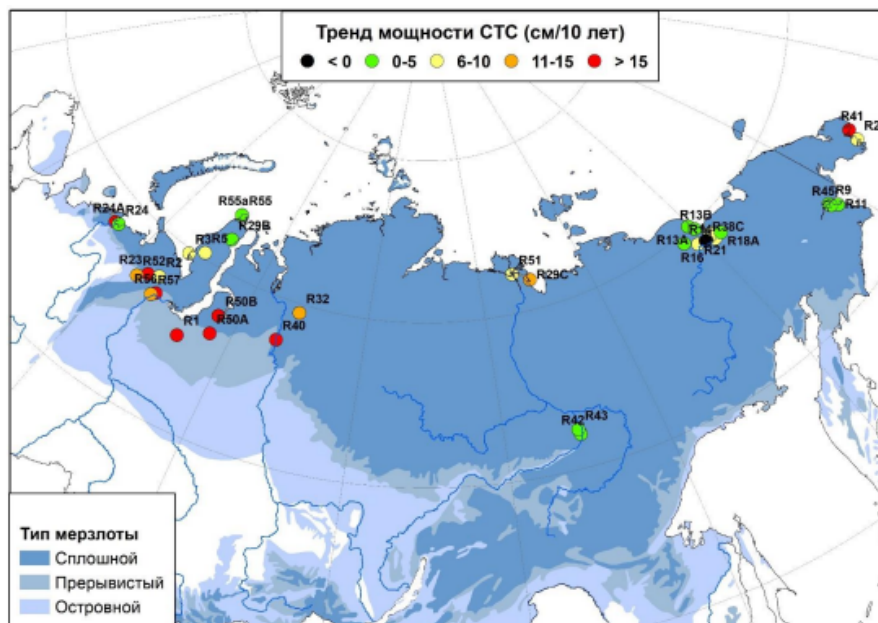


• Рис. 1. Средняя за декабрь-февраль (а) и за июнь-август (б) приповерхностная температура воздуха на 41 станции в морской Арктике в 1951–2021 гг.

• Fig. 1. Mean December-February (a) and June-August (b) surface air temperature at 41 stations in the maritime Arctic during 1951–2021



- Рис. 2. Площадь, занятая морским льдом в Северном Ледовитом океане в марте (а) и в сентябре (б): красным цветом показана летняя температура воздуха в морской Арктике; R – коэффициент корреляции между температурой и площадью, в скобках – между отклонениями от тренда [3]
- Fig. 2. Area occupied by sea ice in the Arctic Ocean in March (a) and September (b): red color shows summer air temperature in the maritime Arctic; R – correlation coefficient between temperature and area, in parentheses between – deviations from trend [3]



- Рис. 3. Тренд мощности CTC за период с начала наблюдений до 2021 г., см/10 лет [4]
- Fig. 3. Trend of mid-melt layer power over the period from the beginning of observations to 2021, cm/10 years [4]

Одними из важных факторов отслеживания изменения климата в Арктической зоне могут быть факторы природной среды, в том числе тепловой режим. Также он является регулирующим фактором, согласно которому происходит становление жизнедеятельности живых организмов. Тепло – многогранный фактор. Благодаря ему определяются видовое разнообразие, динамика роста, цикл жизнеспособности и т. д. Несмотря на исключительность и важность теплового фактора, несущественное изменение средней температуры в Арктике не окажет влияния на исчезновение приспособленных к суровой среде организмов, в том числе эндемиков Арктической

зоны Российской Федерации (АЗРФ). Тем не менее вполне вероятно, что благодаря возрастанию температуры произойдет изменение природной среды и целого региона [5].

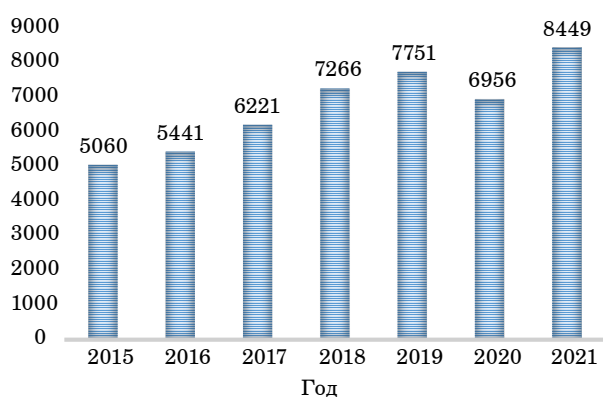
По последним данным, изменение естественной среды в северном регионе уже происходит. В тундрах наблюдается сочетание параметров, приближенное к параметрам северной тайги – биома, абсолютно не свойственного северной точке планеты [6]. Однако стоит учитывать, что смешанные природные зоны формировались самостоятельно под влиянием времени и естественной эволюции, а стремительные климатические изменения происходят быстро и под воздействием

техногенных факторов. Таким образом, среда не успевает адаптироваться, и происходит дестабилизация. Флора и фауна еще не приспособились, в то время как среда уже меняется. Например, белые медведи и многие представители фауны уже сейчас вынуждены искать себе новые места пропитания и мигрировать в поисках пищи.

Отдельным вопросом является изменение свойств и состава почвы в долгосрочной перспективе.

Анализ данных по образованию твердых бытовых отходов в Российской Арктике

В соответствии с Федеральным законом (ФЗ) № 89 «Об отходах производства и потребления», регламентируется принцип обращения с твердыми бытовыми отходами (ТБО). Правильное размещение, хранение и утилизация отходов необходимы для соблюдения экологической безопасности РФ, регламентирующей состояние защищенности окружающей природной среды и здоровья населения.



• Рис. 4. Средний годовой показатель образования отходов в РФ в период с 2015 по 2021 г., млн т
 • Fig. 4. Average annual waste generation in the Russian Federation in the period from 2015 to 2021, mln tons

Федеральный округ	Количество отходов, тысяч тонн
Центральный федеральный округ	17 057,5
Приволжский федеральный округ	9022,3
Южный федеральный округ	5593,9
Сибирский федеральный округ	4935,7
Северо-Западный федеральный округ	4617,5
Уральский федеральный округ	3685,2
Дальневосточный федеральный округ	3124,0
Северо-Кавказский федеральный округ	2466,4

• Рис. 5. Годовой показатель образования ТБО по регионам
 • Fig. 5. Annual municipal solid waste generation rate by region

Согласно данным доклада Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, за 2021 г. на территории России образовалось 8448,6 млн т отходов производства и потребления. Это выше уровня 2020 г. на 21,5 %. Данные за период 2015–2021 гг. приведены на рис. 4.

При этом ТБО от общего количества отходов потребления составили 5 % (48 362,8 тысячи тонн). Распределение объема образования ТБО в разрезе федеральных округов Российской Федерации в 2021 г. показано на рис. 5.

Обработке, а именно – предварительной подготовке отходов к дальнейшей утилизации, включая их очищение, рассортирование и т. д., подверглось около 46,5 % от общей массы. Обезвредили и утилизировали, соответственно, 5,4 и 6,5 % от общей массы. Захоронению подлежали 24,5 % отходов ТБО, из которых большая часть пришлось на Южный федеральный округ [7].

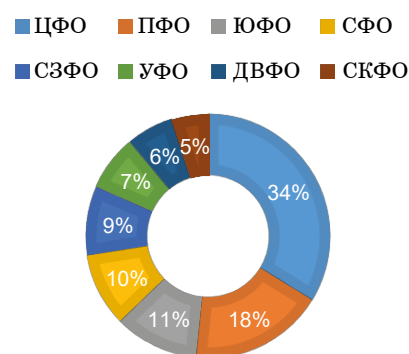
Рассмотрим количество образовавшихся ТБО за тот же период отдельно для регионов АЗРФ. Визуализируем данные на рис. 6.

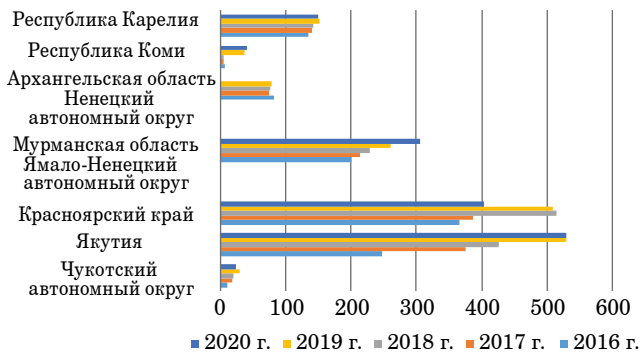
Утилизация отходов в АЗРФ принципиально ничем не отличается от утилизации отходов по всей территории Российской Федерации.

На данный момент, согласно Реестру объектов размещения отходов, в Российской Арктике насчитывается около 218 пунктов, это 25 % от их общего числа по всей России [9]. Большая часть этих пунктов – полигоны и свалки, на которые отправляются отходы.

Проблема обращения с ТБО в АЗРФ в условиях изменения климата

Активное освоение Арктики с каждым годом ведет к образованию колоссального количества отходов на обширных территориях. Привычные методы обращения с отходами в умеренном и юж-





• Рис. 6. Образование ТБО по регионам АЗРФ, млн т [8]

• Fig. 6. Municipal solid waste generation by regions of Arctic, mln tons

ном климатах – складирование и захоронение – воздействуют на экосистемы северного региона негативно. Культивация и разложение отходов в АЗРФ осложняются холодным климатом, высокой влажностью, водоупорными свойствами мерзлых пород и т. д. Складирование на полигонах и свалках сводится к хранению отходов в консервированном (замороженном) состоянии. Таким образом, отходы только накапливаются.

На рубеже XX в. появилась новая проблема обращения с отходами в условиях холодного климата – глобальное увеличение среднегодовой температуры. Стремительное изменение климата ведет к нарушению устоявшегося эволюционного баланса, влияя на состав почвы, видовое разнообразие, географические характеристики и т. д. В XX в. советские инженеры применяли особые техноло-

гии к проектированию жилых домов и помещений на севере страны. Строители адаптировали жилье под Арктический регион, принимая во внимание параметры вечной мерзлоты, свойства почвы, заболоченность, влажность. Напротив, сейчас условия изменяются, почва тает и проседает. И столь продуманные технологии начинают давать сбои. Таким же последствиям подвергнутся полигоны. Продолжение использования полигонов может привести к экологической катастрофе на Севере. Таяние и проседание почвы разрушат инженерные сооружения – полигоны, вследствие чего огромные тонны свалочного газа и загрязняющих веществ попадут в атмосферу. Сточные воды также будут вымывать загрязняющие вещества и переносить их по руслам подземных грунтовых вод.

Почвенный покров Арктики является малоизученным. На данный момент он представляет собой большую проблему для сферы обращения с ТБО. Непонимание природной среды, а именно – особенностей почвенных покровов Арктики, их состава и свойств, может привести к деградации естественных условий.

Как известно, почва Севера расположена в районе вечной мерзлоты. Даже в теплые периоды года грунт не оттаивает более чем на 1,5 м. На рис. 7 показана карта многолетней мерзлоты для России.

На рис. 7 видно, что большая часть Российской Арктики расположена в зоне непрерывной мерзлоты, в которой почва практически не оттаивает. Однако это изменилось за последние годы. Более



• Рис. 7. Карта вечной мерзлоты России

• Fig. 7. Map of permafrost in Russia



• Рис. 8. Модель влияния изменения климата в Арктике на полигоны и свалки

• Fig. 8. Model of Arctic climate change impacts on landfills and dumpsites

детальное изучение Арктики привело к выводу, что с конца 1970-х гг. средняя температура вечной мерзлоты увеличилась и продолжает расти, а сезонно-талый слой стал глубже. Следствием этого являются проседание и сдвигание верхнего почвенного слоя. К примеру, в 2018 г. жители Лонгйира привлекли внимание общественности к проблеме разрушения домов. Ускоренный темп

таяния почвы привел к расшатыванию строительных конструкций. Такое же влияние оказало потепление на Всемирное семеновохранилище, расположенное на острове Шпицберген. По причине изменения структуры почвы здание сдвинулось, из-за чего часто затапливался вход [10]. Единственным подходящим решением данной ситуации стала искусственная заморозка грунта. Очевидно, что для Российской Арктики проблемы будут аналогичными. Из-за изменения физических свойств почвы полигоны и свалки будут абсолютно неэффективны для утилизации отходов. Любое разрушение, вызванное проседанием почвенного покрова, окажет существенное влияние на чувствительные и неплодородные земли. Кроме того, огромное количество подземных вод, русел, канальцев мгновенно будут транспортировать загрязняющие вещества с полигона по всей территории Арктики, а также в моря и океаны. Поэтому подтопления – вторая важная проблема, которую необходимо учитывать в сфере обращения с отходами. Неравномерное таяние вечной мерзлоты приведет к образованию большого количества влаги на поверхностном грунте. При этом неоттаявшая вечная мерзлота не даст влаге впитаться в горные породы. Образуется сильное заболачивание, способное разносить загрязняющие вещества на поверхности почвы. Малое количество питательных компонентов тундровых почв усугубится отложенными в ней загрязняющими веществами, что станет колоссальной проблемой для флоры и фауны Арктики. Модель влияния климатических изменений на полигоны изображена на рис. 8.

Очевидно, что в условиях изменения климата, а именно – потепления в северных регионах, совершенно нецелесообразно использовать привычные и доступные в более природно-устойчивых регионах способы утилизации ТБО. Классические методы строительства и содержания полигонов и свалок несовершенны в условиях изменения почвенного покрова региона.

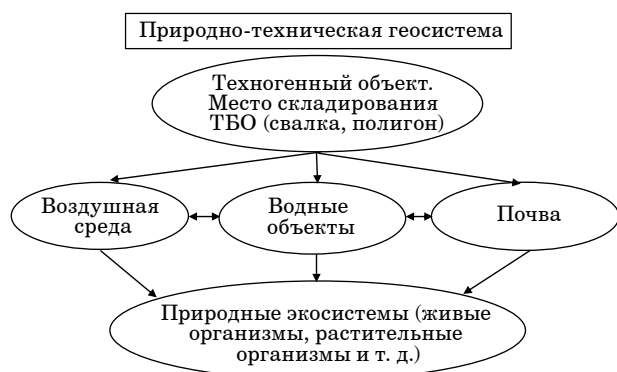
Методика проведения мониторинга природно-технической геосистемы Арктики в области обращения с ТБО в условиях изменения климата

Предотвратить глобальное изменение климата невозможно, тем не менее необходимо предпринять попытки адаптации современных технологий к изменяющимся условиям. В первую очередь, необходимо пересмотреть используемые в настоящее время способы утилизации отходов для предотвращения их негативного

воздействия на природную окружающую среду. Использование последних разработок ученых-инженеров, наилучших доступных технологий в совокупности с результатами биогеологических исследований Арктики позволит наиболее близко подойти к решению проблемы.

Экологическая безопасность – состояние защищенности окружающей среды, т. е. исключение нарушения природного баланса экосистемы вследствие попадания инородных, не входящих в экосистему объектов. Природно-техническая геосистема (ПТГС) – это система, в состав которой входят природные и техногенные (искусственные) объекты, тесно взаимодействующие друг с другом и с окружающей природной средой, расположенные на заданном участке земной поверхности. Таким образом, под ПТГС понимается ограниченная территория хозяйственной или иной деятельности человека, оказывающая негативное влияние на природную экосистему и нарушающая экологическую безопасность среды в районе расположения. Введение понятия природно-технической геосистемы позволяет наиболее подробно изучить процесс антропогенной деятельности на выбранный природный анклав. Для обеспечения экологической безопасности в области обращения с отходами под ПТГС стоит рассматривать природную территорию, на которой расположен технический объект складирования отходов в Арктике – полигон или свалка, вступающий во взаимодействие с природной средой и влияющий негативно на нее. На рис. 9 изображена схема ПТГС «полигон – окружающая среда».

Геосистему формируют определенные показатели. Выявляют ее устойчивость согласно критериям. Показатели и критерии формирования ПТГС «полигон – окружающая среда» приведены в таблице.



• Рис. 9. Структура природно-технической геосистемы «полигон – окружающая среда»

• Fig. 9. Structure of the natural-technical geosystem “landfill – environment”

- Критерии определения границ природно-технической геосистемы «полигон – окружающая среда»
- Criteria for defining the boundaries of the natural-technical geosystem «landfill – environment»

Показатель	Критерий устойчивости
Степень негативного влияния объекта на компоненты окружающей среды	Повышенная концентрация загрязняющих веществ, исходящих от объекта, в зоне влияния объекта санитарно-защитной зоны
Присутствие слоя вечной мерзлоты	Физико-химические показатели почвенного покрова (глубина средне-талого слоя как следствие трансформации почвенного покрова и изменения его физических и химических свойств)
Наличие складированных отходов	Количество отходов, подверженных долговременному хранению на одной территории
Постоянная пониженная температура природной среды	Среднегодовая температура

Таким образом, границы формирования природно-технической геосистемы будут зависеть от вышеуказанных критериев.

Стоит учитывать, что внутрисистемные компоненты тесно связаны друг с другом. Это приводит к «эффекту домино»: изменение структуры природного объекта приведет к разрушению техногенного – пункта хранения отходов. В целях предотвращения разрушения ПТГС вследствие неотвратимых климатических изменений предложена методика проведения мониторинга ПТГС в области обращения с ТБО. Данная методика предназначена для использования региональными органами исполнительной власти Росприроднадзора России.

Методические этапы:

1) определение целей мониторинга. Устойчивость ПТГС «полигон – окружающая среда» зависит от критериев. Изменение их значений, т. е. отклонение от нормы, может свидетельствовать о нарушении баланса рассматриваемой ПТГС. Именно поэтому мониторинг необходимо проводить относительно критериев устойчивости, а именно – концентрации загрязняющих веществ, физико-химических показателей почвы, количества складированных отходов, среднегодовой температуры;

2) планирование – на данном этапе необходимо планомерно определить частоту, длительность, методы мониторинга. Выбранные методы должны включать в себя наилучшие доступные

технологии, соответствующие суровым погодным условиям региона, а также быть экономически малозатратными. Как правило, лучшим способом ведения мониторинга в Арктике являются автоматизированные системы наблюдения – датчики наблюдения, камеры наблюдения, дистанционное зондирование и т. д.;

3) подготовка оборудования – необходимые устройства мониторинга должны располагаться непосредственно на территории ПТГС и в ее санитарно-защитной зоне;

4) подбор кадров – анализ и сбор данных требуют кадровых затрат. Квалифицированные специалисты должны уметь работать с мониторинговым оборудованием, а также обладать навыками работы с большим объемом данных;

5) создание специализированной базы данных (БД) для наблюдения за ПТГС в Арктике. Ведение реестра ПТГС (название, месторасположение, данные мониторинга критериев за выбранный период времени);

6) сбор данных – определение и внедрение графика сбора полученной с приборов информации. Согласно графику, ежедневно, ежемесячно или ежегодно данные изменения критериев будут поступать в специализированные электронные

системы. Таким образом, будет произведено ежедневное пополнение и обновление данных специализированной БД;

7) отчетность – организация годовой отчетности по всем рассматриваемым критериям должна предоставляться Министерству природных ресурсов и Правительству. Полученный результат мониторинга формирует основы для принятия наилучшего управленческого решения в случае рассматриваемой ПТГС.

Методика организации мониторинга в области обращения с отходами изображена на рис. 10.

Практическая значимость методики заключается в предоставлении прямого алгоритма действий для организации мониторинга ПТГС Арктики, необходимых для снижения негативного влияния на полигоны и свалки, а также на окружающую природную среду вследствие изменения климата и нарушения экосистемы северного региона.

Новизна методики заключается в том, что впервые введено понятие ПТГС «полигон – окружающая среда», определены критерии и показатели ПТГС «полигон – окружающая среда», разработана методика организации мониторинга ПТГС «полигон – окружающая среда», отлича-



• Рис. 10. Методика организации мониторинга ПТГС «полигон – окружающая среда»
 • Fig. 10. Methodology of organization of monitoring of PTGS “landfill – environment”

ющаяся индивидуальным подходом к модернизации системы переработки твердых бытовых отходов с учетом изменения климата окружающей среды Арктической зоны, а также с учетом критериев устойчивости ПТГС.

Методика позволяет учесть трансформирование биологических процессов в почве, а также спрогнозировать дальнейшие ее изменения. Таким образом, можно изучить влияние климатических изменений на существующие ПТГС «полигон – окружающая среда» и предотвратить возможные негативные последствия для природной среды, что соответствует целям Программы экологического развития РФ на 2021–2030 гг. [11].

Для решения задач обращения с ТБО в Арктическом регионе предлагаются следующие практические рекомендации, внедрение которых позволит сократить количество отходов, количество полигонов и свалок, снизить накопленный ущерб в АЗРФ, повысить энергоэффективность и уровень занятости населения:

- строительство и внедрение мусороперерабатывающих заводов. Данный метод обращения с ТБО позволит существенно снизить нагрузку на свалки, полигоны и впоследствии на окружающую среду, а также увеличить число рабочих мест, что, в свою очередь, будет способствовать техническому развитию региона;

- строительство и внедрение заводов по термической обработке отходов, побочным продуктом деятельности которых будет являться производство электроэнергии для оснащения населенных пунктов АЗРФ;

- сокращение полигонов и свалок за счет рекультивации с учетом климатических особенностей АЗРФ;

- строительство и внедрение объектов биогазовой энергетики. Сбор органических отходов

с последующей обработкой в метантэнках способен обеспечить регион топливным газом, электроэнергией, теплом и комплексным удобрением.

Заключение

Освоение Арктической зоны – ключевое направление стратегического развития РФ, поскольку энергетический потенциал региона огромен. Однако климатический кризис существенно влияет на освоение Арктики, поскольку вынуждает предпринимать меры высокой адаптивности к быстрым изменениям среды региона.

Большие опасения вызывают стремительные изменения физико-химических свойств почвы, а именно – увеличение средне-талого слоя грунта. Оно может повлечь за собой разрушение физических строений и конструкций, связанных с утилизацией отходов, – полигонов и свалок. Для предотвращения возможной техногенной катастрофы предложена методика мониторинга.

Введение понятия природно-технической геосистемы «полигон – окружающая среда» существенно структурирует районы расположения полигонов и свалок относительно окружающей среды. Определение показателей и критериев устойчивости данных природно-технической геосистемы формирует основные параметры для мониторинга. Таким образом, отслеживание изменения критериев системы «полигон – отходы» способствует дальнейшему анализу и прогнозу трансформации экосистемы Арктики в условиях изменения климата, а также позволит избежать техногенной катастрофы, возможной вследствие разрушения строительных конструкций для хранения твердых бытовых отходов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. «Позеленение» ландшафтов Арктики как следствие современных климатогенных и антропогенных трендов растительности / А. А. Тишков [и др.] // Изв. Рус. геогр. о-ва. 2016. Т. 148, № 3. С. 14–24.
2. Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года (с изм. на 27 февраля 2023 г.)». URL: <https://docs.cntd.ru/document/566091182> (дата обращения: 10.06.2023).
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. М., 2022. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> (дата обращения: 11.06.2025).
4. Permafrost.su. База данных о глубине сезонного оттаивания вечной мерзлоты. URL: <https://www.permafrost.su/search/type/dataset> (дата обращения: 11.06.2022).
5. Multicentury changes to the global climate and carbon cycle: results from a coupled climate and carbon cycle model / G. Bala [et al.] // J. of climate. 2005. Vol. 18, Is. 21. P. 4531–4544.
6. Sevostyanova E., Hasnulin V. Pathological reacting to meteorological changes as a risk-factor of cardiovascular pathology in the North // Clin. med. res. 2013. Vol. 2, № 4. P. 53–57. Doi: 10.11648/j.cmr.20130204.13.

7. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 г. М., 2022. URL: <https://2021.ecology-gosdoklad.ru/doklad/othody-proizvodstva-i-potrebleniya/tverdye-kommunalnye-othody/> (дата обращения: 14.06.2023).
8. Дорощева А. С. Система обращения с отходами в Арктической зоне и районах Крайнего Севера // Novelty. Experiment. Traditions (N. Ex. T). 2022. № 2 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-obrascheniya-s-othodami-v-arkticheskoy-zone-i-rayonah-kraynego-severa> (дата обращения: 16.06.2023).
9. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/42720> (дата обращения: 16.06.2023)
10. The Barents observer. Thawing permafrost makes big trouble for world's northernmost town. URL: <https://thebarentsobserver.com/en/arctic/2018/10/thawing-permafrost-troubles-longyearbyen> (дата обращения: 17.06.2023)
11. Постановление Правительства Российской Федерации № 133 от 08.02.2022 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021 – 2030 годы». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_409370/09e31d7722fdeba9843162c7b8478eaf317b68dc/ (дата обращения: 21.06.2023).

REFERENCES

1. Tishkov A., Belonovskaya A. A., Vaisfeld M. A. et al. "Greening" of Arctic landscapes as a consequence of modern climatic and anthropogenic vegetation trends. *Izv. of the Russian geographical society*. 2016;148(3):14–24. (In Russ.).
2. Decree of the President of the Russian Federation "On the Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2035 (as amended on 27 February 2023)". Available from: <https://docs.cntd.ru/document/566091182> [Accessed 10 June 2023].
3. Report on climate peculiarities on the territory of the Russian Federation for 2021. Moscow; 2022. Available from: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> [Accessed 11 June 2023].
4. Permafrost.su. Database on the depth of seasonal thawing of permafrost. Available from: <https://www.permafrost.su/search/type/dataset> [Accessed 11 June 2023].
5. Bala G., Caldeira K., Mirin A. et al. Multicentury changes to the global climate and carbon cycle: results from a coupled climate and carbon cycle model. *J. of climate*. 2005;18(21):4531–4544.
6. Sevostyanova E., Hasnulin V. Pathological reacting to meteorological changes as a risk-factor of cardiovascular pathology in the North. *Clin. med. res*. 2013;2(4):53–57. Doi: 10.11648/j.cmr.20130204.13.
7. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. State report on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2021. Moscow; 2022. Available from: <https://2021.ecology-gosdoklad.ru/doklad/othody-proizvodstva-i-potrebleniya/tverdye-kommunalnye-othody/> [Accessed 14 June 2023].
8. Doroshcheva A. S. System of waste management in the Arctic Zone and areas of the Extreme Northern. *Novelty. Experiment. Traditions (N. Ex. T)*. 2022;(2(18)). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-obrascheniya-s-othodami-v-arkticheskoy-zone-i-rayonah-kraynego-severa> [Accessed 16 June 2023].
9. Unified interdepartmental information and statistical system (EMISS). Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/42720> [Accessed 16 June 2023].
10. The Barents observer. Thawing permafrost makes big trouble for world's northernmost town. Available from: <https://thebarentsobserver.com/en/arctic/2018/10/thawing-permafrost-troubles-longyearbyen> [Accessed 17 June 2023].
11. Resolution of the Government of the Russian Federation № 133 from 08.02.2022 "On Approval of the Federal scientific and technical programme in the field of ecological development of the Russian Federation and climate change for 2021–2030 years". Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_409370/09e31d7722fdeba9843162c7b8478eaf317b68dc/ [Accessed 21 June 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Область научных интересов – эколого-технологическое нормирование, инновационные технологии и

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

Research interests – ecological-technological standardization, innovative technologies and ecological-economic assessment of safety in natural-technical sys-

эколого-экономическая оценка безопасности в природно-технических системах, методы обеспечения экологической безопасности производства.

Минкинен Елизавета Алексеевна, магистрант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – глобальное изменение климата, обращение с бытовыми отходами, экологические проблемы Арктического региона.

Поступила в редакцию 02.10.2023

Поступила после рецензирования 06.10.2023

Принята к публикации 09.10.2023

tems, methods of ensuring ecological safety of production.

Minkinen Elizaveta A., Master Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – global climate change, municipal waste management, environmental problems of the Arctic region.

Received 02.10.2023

Revised 06.10.2023

Accepted 09.10.2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Епифанцев К. В. Проблемы настройки датчиков RoundTest RA-120P по углу наклона и по высотным параметрам.....	5
Иванов Ю. П. Универсальный финитно-временной оптимальный метод фильтрации дискретных сигналов информационно-измерительных систем	11
Винниченко А. В. Разработка структуры вероятностной модели для многономенклатурного производства	18
Мабхеш М., Тушавин В. А. Оценка результативности потока создания ценности	23

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ

Назаревич С. А., Свириденко А. В. Исследование влияния климатических факторов на процесс филаментизации при прототипировании аддитивных изделий	27
Мастеров А. П., Белай В. Е., Выграновская А. В., Солёный С. В. Формирование архитектуры системы Интернета вещей	32
Назаревич С. А., Пашина Е. А. Визионерская инноватика как инструмент цифровой трансформации	43

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Смирнов А. О. Спектральный анализ и простейшие решения модифицированного уравнения Кортевега – де Фриза	49
Вагизов М. Р. Геоинформационное моделирование и искусственный интеллект	56

ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Федосеева К. А. Модульная структура системы управления характеристиками пены калийной флотомашини	61
--	----

CONTENTS

INSTRUMENTATION, METROLOGY, STANDARDIZATION AND QUALITY MANAGEMENT

Epifancev K. V. Problems with setting up RoundTest RA-120P sensors by inclination angle and height parameters.....	5
Ivanov Yu. P. Universal finite-time optimal method of filtering discrete signals of information and measurement systems	11
Vinnichenko A. V. Development of a probabilistic model structure for multi-nomenclature production	18
Mabhash M., Tushavin V. A. Evaluating the performance of the value creation stream.....	23

CYBERPHYSICAL SYSTEMS AND DIGITAL TRANSFORMATION

Nazarevich S. A., Sviridenko A. V. Study of the influence of climatic factors on the filamentization process during prototyping of additive products	27
Masterov A. P., Belay V. E., Vygranovskaya A. V., Solyonyj S. V. Forming the architecture of the Internet of things system.....	32
Nazarevich S. A., Pashina E. A. Visionary innovation as a tool for digital transformation	43

FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLIED RESEARCH

Smirnov A. O. Spectral analysis and simplest solutions of the modified Korteweg – de Vries equation.....	49
Vagizov M. R. Geoinformation modeling and artificial intelligence	56

DIGITAL ECONOMY AND ORGANIZATION MANAGEMENT

Fedoseeva K. A. Modular structure of a foam characteristics control system for potassium flotation machine	61
---	----

Шаклеина П. А., Измайлова Е. В. Влияние пандемии COVID-19 на степень употребления легальных нейростимулирующих веществ на примере Финляндии	66
Плехов П. В., Чекулаева В. А. Модельное исследование влияния пандемии COVID-19 на состояние железнодорожного транспорта Германии	74
Жильникова Н. А., Минкин Е. А. Совершенствование методов обращения с твердыми бытовыми отходами в Арктике с учетом климатических изменений.....	80

Shakleina P. A., Izmaylova E. V. Impact of the COVID-19 pandemic on the extent of exposure to legal neurostimulant substances using Finland as a case study.....	66
Plekhov P. V., Chekulaeva V. A. Model study of the impact of the COVID-19 pandemic on the state of railway transport in Germany	74
Zhilnikova N. A., Minkinen E. A. Improvement of waste disposal methods with regard to climate change in Arctic	80