

ISSN print 2658-3488
ISSN online 2658-6436

№2(24)
2024

Научно-технический журнал

Автоматизация и моделирование

в проектировании и управлении



АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ



В проектировании и управлении

Издается с 2018 года

№ 2(24) 2024

DOI:10.30987/issn.2658-3488

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета – Сигов А.С., д-р. физ.-мат. наук, проф., академик РАН

Заместитель председателя редакционного совета – Аверченков А.В., д-р. техн. наук, доц.

Заместитель председателя редакционного совета – Федонин О.Н., д-р. техн. наук, проф.

Бобьрь М.В., д-р. техн. наук, проф. (Курск)
Бочкарев П.Ю., д-р. техн. наук, проф. (Саратов)
Еременко В.Т., д-р. техн. наук, проф. (Орел)
Ивашук О.А., д-р. техн. наук, проф. (Белгород)
Иньков Ю.М., д-р. техн. наук, проф. (Москва)
Карпенко А.П., д-р. физ.-мат. наук, проф. (Москва)

Квятковская И.Ю., д-р. техн. наук, проф. (Астрахань)

Кравец А.Г., д-р. техн. наук, проф. (Волгоград)
Курейчик В.В., д-р. техн. наук, проф. (Таганрог)
Макарова Е.И., д-р. техн. наук, доц. (Санкт-Петербург)

Мешеряков В.Н., д-р. техн. наук, проф. (Липецк)
Михальченко С.Г., д-р. техн. наук, доц. (Томск)

Редколлегия

Главный редактор – **Аверченков В.И.** д-р. техн. наук, проф.

Зам. главного редактора – **Захарова А.А.** д-р. техн. наук, доц.

Зам. главного редактора – **Пугачев А.А.** д-р. техн. наук, доц.

Зам. главного редактора – **Малаханов А.А.** канд. техн. наук, доц.

Никитин В.В., д-р. техн. наук, доц. (Санкт-Петербург)

Носков С.И., д-р. техн. наук, проф. (Иркутск)
Петрешин Д.И., д-р. техн. наук, доц. (Брянск)
Подвесовский А.Г., канд. техн. наук, доц. (Брянск)

Пугачев А.А., д-р. техн. наук, доц. (Брянск)
Пылькин А.Н., д-р. техн. наук, проф. (Рязань)
Скрыпников А.В., д-р. техн. наук, проф. (Воронеж)

Федяева Г.А., д-р. техн. наук, доц. (Брянск)
Феофанов А.Н., д-р. техн. наук, проф. (Москва)
Хейфец М.Л., д-р. техн. наук, проф. (Беларусь)
Чепчуров М.С., д-р. техн. наук, проф. (Белгород)
Шептунов С.А., д-р. техн. наук, проф. (Москва)
Ярушкина Н.Г., д-р. техн. наук, проф. (Ульяновск)

Зам. главного редактора – **Подвесовский А.Г.** канд. техн. наук, доц.

Адрес редакции:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
тел.: (4832) 56-49-90

www.aimpu.ru

E-mail: aim-pu@mail.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-73192 от 02 июля 2018 года

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

Журнал распространяется по подписке: индекс **Э80855** по интернет-каталогу "Пресса по подписке".

Статьи журнала находятся под лицензией **CC BY 4.0 Creative Commons Attribution 4.0 License**
Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис **CrossRef**

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по научным специальностям: 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.3.4. – Управление в организационных системах; 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7 - Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы.

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

AUTOMATION AND MODELING

SCIENTIFIC TECHNICAL
JOURNAL



in design and management

Issued since 2018

№ 2(24) 2024

DOI:10.30987/issn.2658-3488

QUARTERLY SCIENTIFIC JOURNAL

The founder of the publication – the Federal state budgetary educational
institution of higher education

«Bryansk State Technical University» (BSTU)

Chairman of Editorial Board – Sigov A.S., D. Phys.-Mat., Professor, Academician of RAS

Deputy Chairman of Editorial Board – Averchenkov A.V., D. Eng., Associate professor

Deputy Chairman of the editorial Board – Fedonin O.N., D. Eng., Professor

M.Yu. Bobyr, D. Eng., Prof., (Kursk)

P.Yu. Bochkaryov, D. Eng., Prof., (Saratov)

V.T. Yeremenko, D. Eng., Prof., (Orel)

O.A. Ivashchuk, D. Eng., Prof., (Belgorod)

Yu.M. Inkov, D. Eng., Prof., (Moscow)

A.P. Karpenko, D. Phys.-Mat., Prof., (Moscow)

I.Yu. Kvyatkovskaya, D. Eng., Prof., (Astrakhan)

A.G. Kravets, D. Eng., Prof., (Volgograd)

V.V. Kureichik, D. Eng., Prof., (Taganrog)

E.I. Makarova, D. Eng., Assoc. Prof.,

(St. Petersburg)

V.N. Meshcheryakov, D. Eng., Prof., (Lipetsk)

S.G. Mikhhalchenko, D. Eng., Assoc. Prof. (Tomsk)

Editorial board

Editor-in-Chief – Averchenkov V.I. D. Eng., Prof.,

*Deputy Editor-in Chief – Zakharova A.A. D. Eng.,
Assoc. Prof.*

*Deputy Editor-in Chief – Pugachev A.A. D. Eng.,
Assoc. Prof.*

*Deputy Editor-in Chief – Malakhanov A.A. Can.
Eng., Assoc. Prof.*

V.V. Nikitin, D. Eng., Assoc. Prof., (St. Petersburg)

S.Yu. Noskov, D. Eng., Prof., (Irkutsk)

D.I. Petreshin, D. Eng., Assoc. Prof., (Bryansk)

**A.G. Podvesovskiy, Can. Eng., Assoc. Prof.
(Bryansk)**

A.A. Pugachev, D. Eng., Assoc. Prof., (Bryansk)

A.N. Pylkin, D. Eng., Prof., (Bryansk)

A.V. Skrypnikov, D. Eng., Prof., (Voronezh)

G.A. Fedyayeva, D. Eng., Assoc. Prof., (Bryansk)

A.N. Feofanov, D. Eng., Prof., (Moscow)

M.L. Kheifets, D. Eng., Prof., (Minsk, Belarus)

M.S. Chepchurov, D. Eng., Prof., (Belgorod)

S.A. Sheptunov, D. Eng., Prof., (Moscow)

N.G. Yarushkina, D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)

*Deputy Editor-in Chief – Podvesovskiy A.G. Can.
Eng., Assoc. Prof.*

*Address of edition 7, 50 Years of October Avenue,
Bryansk, Russia, 241035*

Tel.: (4832) 56-49-90

www.aimpu.ru

E-mail: aim-pu@mail.ru

The Journal is registered by the Federal
Service for Supervision in the Sphere of Telecom,
Information Technologies and Mass Communications
of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).
Registration certificate ПИ № ФЦ77-73192 of July 2, 2018

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

The magazine is distributed by subscription:
index **Э80855** in the online catalog "Subscription Press".

The articles of the journal are under the CC BY 4.0 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef

Scientific topics of the journal: Automation and control of technological processes and industries; Mathematical modeling, numerical methods and software packages; Management in organizational systems; Computer modeling and design automation; Electrotechnical complexes and systems.

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal «Automation and modeling in design and management» is allowed only with the Editorial Board's permission and a reference to the source of information

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Гумунюк П.В., Шурпо А.Н. Роль словаря понятий в автоматном программировании на примере разработки системы управления автоматизированного аквариума

Сорока Д.О., Карлова Т.В. Моделирование технологической среды в условиях автоматизации технологий предприятия

Математическое и компьютерное моделирование

Аверченков А.В., Куклин В.Ж., Червяков Л.М., Шабанов А.А. Формализация процедуры калибровки инструмента для технологической подготовки сборочного производства в автомобилестроении

Лютоев А.А., Хабаева Е.В. Алгоритм поиска оптимальной сети полигонов сбора твердых коммунальных отходов

Подвесовский А.Г., Лагереv Д.Г., Филонов А.А. Применение интеллектуального анализа данных для оценки расхода заряда аккумулятора беспилотного летательного аппарата

Стрижко М.А. Нейросетевое прогнозирование параметров транспортных потоков в интеллектуальных системах светофорного регулирования

Управление в организационных системах

Мельников М.А., Плющаев В.И. Влияние погрешностей измерения координат судна на качество процесса управления

Аверченков В.И., Якимов А.И., Борчик Е.М., Якимов Е.А., Денисевич Д.А. Оптимизация последовательности выполнения заказов предприятия эвристическими алгоритмами

Бушева А.Г., Фефанов А.Н. Компоненты системы подбора специалистов в состав экспертных групп

Дранко О.И., Тароян К.К. Прогнозирование выручки быстрорастущей компании с использованием логистической кривой

CONTENTS

Automation and control of technological processes and production, automated design systems

4 Gumunyuk P.V., Shurpo A.N. The Role of the Concept Dictionary in Automa-Based Programming on the Example of Developing an Automated Aquarium Control System

12 Soroka D.O., Karlova T.V. Modelling the technological environment in the conditions of automating the enterprise technologies

Mathematical and computer modeling

19 Averchenkov A.V., Kuklin V.Zh., Chervyakov L.M., Shabanov A.A. Formalizing the Tool Calibration Procedure for the Technological Preparation of Assembly Production in the Automotive Industry

25 Lyutoev A.A., Khabaeva E.V. Algorithm for Searching for an Optimal Network of Polygons for Collecting Solid Communal Waste

35 Podvesovskiy A.G., Lagerev D.G., Filonov A.A. Using Data Mining to Estimate Unmanned Aerial Vehicle Battery Consumption

45 Strizhko M.A. Neural Network Forecasting of Transport Flow Parameters in Intelligent Traffic Light Control Systems

Management in organizational systems

54 Melnikov M.A., Plyushchaev V.I. Error Influence of Measuring the Ship's Coordinates on the Control Process Quality

65 Averchenkov V.I., Yakimov A.I., Borchik E.M., Yakimov E.A., Denisevich D.A. Optimizing the Sequence of Enterprise Orders Using Heuristic Algorithms

77 Busheva A.G., Feofanov A.N. Components of the System for Selecting Specialists for Expert Groups

84 Dranko O.I., Taroyan K.K. Forecasting the Revenue of a Fast-Growing Company Using a Logistic Curve

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 331.101.1

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-4-11

РОЛЬ СЛОВАРЯ ПОНЯТИЙ В АВТОМАТНОМ ПРОГРАММИРОВАНИИ НА ПРИМЕРЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АКВАРИУМА

Павел Васильевич Гумунюк^{1✉}, Александр Николаевич Шурпо^{2✉}

^{1, 2} Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия

¹ pavel05091997@yandex.ru

² a-shurpo@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1962-1969>

Аннотация. Рассматривается вопрос применения методов технологии автоматного программирования для разработки программного обеспечения автоматизированного аквариума. Подробно разобран технологический процесс функционирования аквариума и обоснован выбор тех или иных аппаратных решений, включенных в автоматизированную систему управления аквариумом. Обоснована необходимость написания системы управления объекта (аквариума) и обоснованы способы её использования. Разобрана структура системы управления, где каждому новому фрагменту кода в данной программе для справки дается пояснение его функционала и возможностей применения, взятое из словаря понятий методики автоматного программирования. Представлен результат в виде программного кода и блок-схемы, которые переводят, сформированные на знаниях о технологическом устройстве аквариума, правила работы данной системы в язык логики. Такой способ разработки программного обеспечения является «машинным» переводом четко составленного человеком текста, являясь попыткой показать, что процесс написания программного кода представляет собой процесс перевода текста с одного языка на другой, а также то, что этот способ программирования прост в освоении и удобен в эксплуатации. При этом первый язык понятен человеку, а второй язык адаптирован для компьютера. Для устойчивой работы этой методики перевода необходим словарь, который позволяет пользователю формировать задание для компьютера.

Ключевые слова: автоматизируемый аквариум; умный контроль; switch-технология; автоматное программирование; система управления; индустрия 4.0

Для цитирования: Гумунюк П.В., Шурпо А.Н. Роль словаря понятий в автоматном программировании на примере разработки системы управления автоматизированного аквариума // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-4-11.

Original article

Open Access Article

THE ROLE OF THE CONCEPT DICTIONARY IN AUTOMA-BASED PROGRAMMING ON THE EXAMPLE OF DEVELOPING AN AUTOMATED AQUARIUM CONTROL SYSTEM

Pavel V. Gumunyuk^{1✉}, Alexander N. Shurpo^{2✉}

^{1, 2} Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ pavel05091997@yandex.ru

² a-shurpo@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1962-1969>

Abstract. *The paper considers the issue of using automa-based programming technology methods for developing software for an automated aquarium. The technological process of operating the aquarium is analyzed in detail and the choice of certain hardware solutions included in the automated aquarium control system is substantiated. The need to write a control system for the object (aquarium) is justified and the methods of its use are proved. The control system structure is analyzed, where each new piece of code in this program is given an explanation of its functionality and application possibilities for reference, taken from the concept dictionary of automa-based programming techniques. The result is presented in the form of a program code and block diagrams that translate the rules of this system operation into the language of logic, based on the knowledge about the technological structure of the aquarium. This software development method is a “machine” translation of a clearly written human text, being an attempt to show that the process of writing a program code is a process of translating a text from one language into another, and also that this method of programming is easy to learn and convenient in operation. In this case, the first language is understandable to humans, and the second language is adapted for computers. For a stable operation of this translation technique, a dictionary is needed that allows the user to create a task for the computer.*

Keywords: automated aquarium; smart control; switch technology; automa-based programming; control system; industry 4.0.

For citation: Gumunyuk P.V., Shurpo A.N. The Role of the Concept Dictionary in Automa-Based Programming on the Example of Developing an Automated Aquarium Control System. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-4-11.

Введение

Автоматизированный аквариум может быть использован как для разведения рыбы и других, обитающих в воде существ (раков, крабов, креветок, устриц и им подобных), с целью получения икры, молодняка или рыбной продукции в рыболовных хозяйствах, так и для применения в домашних условиях [1].

Воссоздание климата в искусственной водной среде является трудоемким процессом, требующим слаженной работы определенного оборудования. Сложность обеспечения необходимых условий зачастую зависит от чувствительности будущих обитателей, что влияет на их дальнейшее комфортное и здоровое существование и развитие.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Среди технических средств, обеспечивающих нормальные условия для роста обитателей аквариума, можно выделить следующие:

- фильтр очищает аквариумную воду от продуктов жизнедеятельности и подлежит замене через определенные промежутки времени;
- датчик температуры контролирует температуру воды;
- первый насос – снабжает воду кислородом для дыхания обитающих в воде существ;
- второй насос – обеспечивает циркуляцию воды.

Среди технологических параметров воды, которые необходимо постоянно контролировать выделим основные – это температура, насыщение кислородом и её очистка от отходов [2].

Технологическая схема аквариума представляет собой резервуар с системой труб для обеспечения циркуляции воды с помощью насоса. Труба, забирающая воду из аквариума, имеет систему фильтров для очистки воды от имеющихся в ней твердых частиц и вредных химических соединений, образующихся в результате жизнедеятельности обитателей резервуара с водой. Фильтрация необходима ранее всех остальных процессов во избежание засорения приборов, находящихся далее по технологической цепи. Далее расположен клапан для набора воды, который открывается при сигнале поплавкового датчика уровня в аквариуме о недостаточном количестве воды. Следующим звеном является водонагревательный элемент для поддержания температуры воды в комфортном для обитателей аквариума диапазоне. Самым важным агрегатом в технологической цепи является центробежный насос, который обеспечивает циркуляцию водной массы во всем аквариуме.

Для данной схемы выбран менее мощный центробежный насос по сравнению с поршневым. Поршневые насосы имеют свойство прорывать трубы при образовании засоров в трубах от накопления твердых частиц в жидкости. Из-за наличия в воде аквариума различных органических твердых остатков возможно образование засоров в трубах, несмотря на наличие фильтра в самом начале циркуляционного узла. При образовании засора центробеж-

ный насос просто заглохнет и вода перестанет циркулировать, в то время как поршневой насос продолжит работать, что приведет к нарастанию давления в трубах и к поломке системы очистки, насыщения кислородом и нагрева воды. Поэтому менее мощный центробежный насос вызовет меньшую проблему [3].

Наличие насоса помогает растворять в воде кислород, необходимый для дыхания живущих в резервуаре существ. Как известно, при нагревании воды, кислород вытесняется из нее, но в вопросах данной задачи потери его будут невелики из-за слишком малого нагрева воды.

Ознакомившись с техническими средствами, регулирующими параметры системы, можно выделить устойчивые состояния для обеспечения её работы, которые необходимы для умного контроля этой автоматизированной системы.

Рассмотрим все состояния системы [4].

1. Загрязнился фильтр.
2. Перестал циркулировать насос.
3. Упала температура – включить нагрев.
4. Повысилась температура – выключить нагрев.
5. Добрать извне воды.
6. Слив воды.

Рассмотрим роль каждого состояния в технологическом процессе.

1. Датчики засорения фильтра в данной системе не предусмотрены из-за технологической сложности их создания. Определить, что срок использования фильтра подошел к концу можно при помощи таймера, который будет вести отчет от момента его установки, до указанного производителем времени его работы. Если же приобретать фильтры с индикаторами загрязненности то, во-первых, такие фильтры стоят гораздо дороже обычных, а, во-вторых, такой индикатор будет сложно включить в автоматизированную систему, а наблюдать за его состоянием придется визуально, поэтому данный вариант не подходит из-за большой цены и малой пользы [5].

2. При нормальной работе насос циркулирует постоянно. Остановка насоса допустима только для замены фильтра, во всех прочих случаях – это поломка автоматизированной системы.

3. Резервуар аквариума оснащен температурным датчиком, который реагирует на изменение температуры и включает или выключает нагревательный элемент для поддержания требуемых условий.

4. При повышении температуры необходимо выключить нагрев, так как нет никаких источников, способных извне нагреть воду. Единственным способом изменения температуры воды является нагревательный элемент.

5. Аквариум оснащен поплавковым датчиком, который сигнализирует об изменении уровня жидкости в резервуаре и далее по технологической цепи перед центробежным насосом установлен кран для набора новой и слива старой воды при ее сильном загрязнении.

6. Слив осуществляется по показанию таймера, так же как и замена фильтра. Со временем в воде будут накапливаться вещества, которые нельзя отфильтровать. Эти вещества являются остатками жизнедеятельности аквариумных обитателей, а также сторонние продукты, которые попадают в аквариум извне и наносят вред рыбам и другой фауне в емкости. Слив части воды с вредными веществами и набор новой воды помогает снизить концентрацию опасных химических и органических соединений в ней и позволяет комфортно существовать обитателям аквариума [6].

На рис. 1. представлена схема данного аквариума.

Для корректного составления программы необходимо изучить требуемый технологический процесс и попытаться разделить его этапы на так называемые устойчивые состояния. Под устойчивым состоянием подразумевается поведение системы, которое длится определенный промежуток времени и характеризуется определенным значением переменных этой системы (физических, программных, аппаратно-реализуемых различными техническими устройствами).

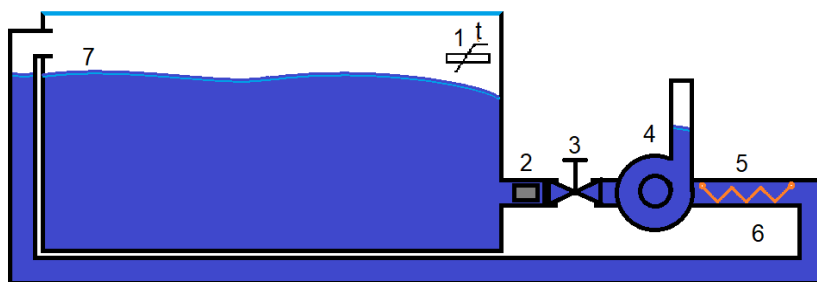


Рис. 1. Схематическое изображение автоматизированного аквариума

1 – температурный датчик; 2 – фильтр; 3 – клапан; 4 – центробежный насос; 5 – нагревательный элемент; 6 – система труб; 7 – резервуар с водой

Fig. 1. Schematic illustration of an automated aquarium

1 – temperature sensor; 2 – filter; 3 – valve; 4 – centrifugal pump; 5 – heating element; 6 – pipe system; 7 – water tank

Ядро программы будет иметь оператора switch (второе название метода автоматного программирования – это свитч-технология. Оператор switch применяется в любой программе, написанной данным методом. В языках, не имеющих оператора switch, применяется конструкция if, if/else).

Оператор switch необходим, так как только он способен осуществлять перебор состояний системы.

Состояние обозначается следующим образом. Вверху идет комментарий с номером состояния и его названием. Второй строкой идет обозначение автоматов, которые инициализируются в теле данного состояния. Последней строкой обозначается выполнение определенных внутри данного состояния действий, переменных и указания к их выполнению. Схематическое изображение устойчивого состояния представлено на рис. 2.

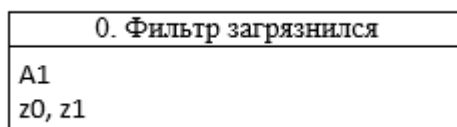


Рис. 2. Схематическое изображение устойчивого состояния

0 – начальное (первое) состояние систем; A1 – обращение к автомату, который следит за временем; z0, z1 – выполнение команды центробежным насосом, обозначается как Filter = false, pumpState = true

Fig. 2. Steady State Schematic Representation

0 – initial (first) state of systems; A1 – access to the machine that keeps track of time; z0, z1 – execution of a command by a centrifugal pump, designated as Filter = false, pumpState = true

Переход между состояниями графически обозначается стрелками. На стрелке указывается значение e вверху и z внизу; e обозначает переменную, инициализация которой приведет к переходу в другое состояние. Эта переменная исполняет роль ключа, дающего разрешение на переход. Символ z обозначает то же самое, что он обозначает внутри состояния.

В переходе между состояниями при необходимости может происходить выполнение определенных действий, переменных и указания к их выполнению, в состоянии это происходило безусловно, а здесь во время перехода при требуемой инициализации переменной e . Схематическое изображение перехода между состояниями представлено на рис. 3.

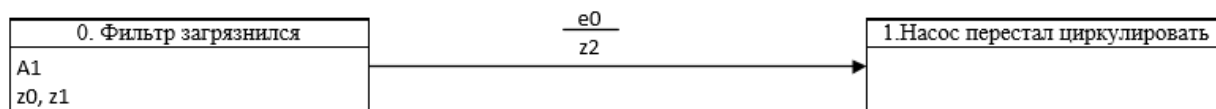


Рис. 3. Схематическое изображение перехода между состояниями

Fig. 3. Schematic representation of the transition between states

Где $e1$ – условие перехода во второе состояние, $z2$ – действие на переход в другое состояние или действие, выполняемое при переходе в другое состояние, обозначается как:

If (pumpState = true) AkvariumState = 1.

Переход между различными состояниями представляет собой фрагмент case конструкции switch. Как известно, переключение между состояниями в операторе switch может про-

исходить неограниченное количество раз и количество элементов case может быть так же неограниченным. Такие принципы идеально подходят устойчивым состояниям, которые получаются путем перевода формального языка правил исследуемой системы в свод законов ее функционирования, именуемые как состояния [7].

Словарь понятий представляет собой набор правил, описывающих принципы составления графов переходов, методики автоматного программирования. Более подробно с ним можно ознакомиться в репозитории.

Словарь понятий отражает одну из моделей взаимодействия методики автоматного программирования с существующей базой информации по технологическому объекту, для которого применяется технология автоматного программирования.

Определимся с переменными системы управления аквариума:

```
Int AkvariumState; // Состояние аквариума.
```

```
bool Filter = true; // Состояние фильтра, где true – фильтр чист, а false – следует заменить фильтр (срабатывает по таймеру).
```

```
bool pumpState = true; // Состояние насоса равно true при нормальной работе, значение false свидетельствует об аварии. Единственным случаем, когда насос может отключаться это намеренная остановка для смены фильтра и очистки аквариума. Насос снабжен энкодером, который фиксирует скорость его вращения. Эта скорость всегда одинакова, поэтому датчик необходим самый примитивный, свидетельствующий только о том, что скорость вращения равна скорости, указанной в технических характеристиках изделия. Если энкодер указывает на отсутствие вращения лопастей насоса, то это свидетельствует о его поломке.
```

```
float tempAkvarium; // Температура аквариума, если она становится меньше значения  $X$  (выбирается индивидуально для каждого вида аквариумных обитателей) понижение или повышение данного значения на величину  $Y$  свидетельствует о необходимости включить или выключить нагревательный элемент.
```

```
float waterLevel; // Уровень воды в аквариуме, при снижении установленного уровня  $Z$  на  $W$  единиц, подается сигнал на кран набора воды. Также слив и набор воды происходит периодически по истечению интервала  $T$ . Сначала происходит слив  $Q$  единиц, затем через промежуток  $t$  набор новой воды равный слитому количеству.
```

```
bool valveOn = false; // Команда для управления клапаном, где true – команда на открытие, false – на закрытие.
```

```
bool heaterOn = false; // Команда для нагрева воды, где true – команда на включение нагрева, false – на отключение.
```

Код написан на языке C# подробнее с ним и с примером словаря понятий можно ознакомиться в репозитории <https://github.com/pavel-proger/Akvarium>.

Систему целесообразно разделить на два автомата. Первый автомат $A0$ работает с основной логикой системы и имеет разветвленный программный код, который будет приведен ниже. Второй автомат $A1$ необходим для подсчета времени, необходимого для смены фильтра в аквариуме.

```
Timer = New.Timer ();
```

```
Filter = Timer;
```

Фрагмент программного кода представлен ниже:

```
Switch AkvariumState
```

```
Case 0 // Фильтр загрязнился.
```

```
Filter = false;
```

```
pumpState = true;
```

```
If( pumpState = true ) AkvariumState = 1;
```

```
If( tempAkvarium < X ) AkvariumState = 2;
```

```
If( tempAkvarium > X ) AkvariumState = 3;
```

```
If( waterLevel < Z ) AkvariumState = 4;
```

```
If( waterLevel > Z ) AkvariumState = 5;
```

```
Case 1 // Насос перестал циркулировать.
```

```
If( Filter = true ) AkvariumState = 0;
```

```
If( tempAkvarium < X ) AkvariumState = 2;
```

```
If( tempAkvarium > X ) AkvariumState = 3;
```

```

If( waterLevel < Z ) AkvariumState = 4;
If( waterLevel > Z ) AkvariumState = 5;
pumpState = false;
Case 2 // Температура упала включить нагрев.
If( Filter = true ) AkvariumState = 0;
If( pumpState = true ) AkvariumState = 1;
If( tempAkvarium > X ) AkvariumState = 3;
If( waterLevel < Z ) AkvariumState = 4;
If( waterLevel > Z ) AkvariumState = 5;
heaterOn = true;
Case 3 // Температура повысилась выключить нагрев.
If( Filter = true ) AkvariumState = 0;
If( pumpState = true ) AkvariumState = 1;
If( tempAkvarium < X ) AkvariumState = 2;
If( waterLevel < Z ) AkvariumState = 4;
If( waterLevel > Z ) AkvariumState = 5;
heaterOn = false;
Case 4 // Донабор воды из вне.
If( Filter = true ) AkvariumState = 0;
If( pumpState = true ) AkvariumState = 1;
If( tempAkvarium < X ) AkvariumState = 2;
If( tempAkvarium > X ) AkvariumState = 3;
If( waterLevel > Z ) AkvariumState = 5;
valveOn = true;
Case 5 // Слив воды.
If( Filter = true ) AkvariumState = 0;
If( pumpState = true ) AkvariumState = 1;
If( tempAkvarium < X ) AkvariumState = 2;
If( tempAkvarium > X ) AkvariumState = 3;
If( waterLevel < Z ) AkvariumState = 4;
valveOn = false;

```

Программный код в виде блок-схемы представлен на рис. 4.

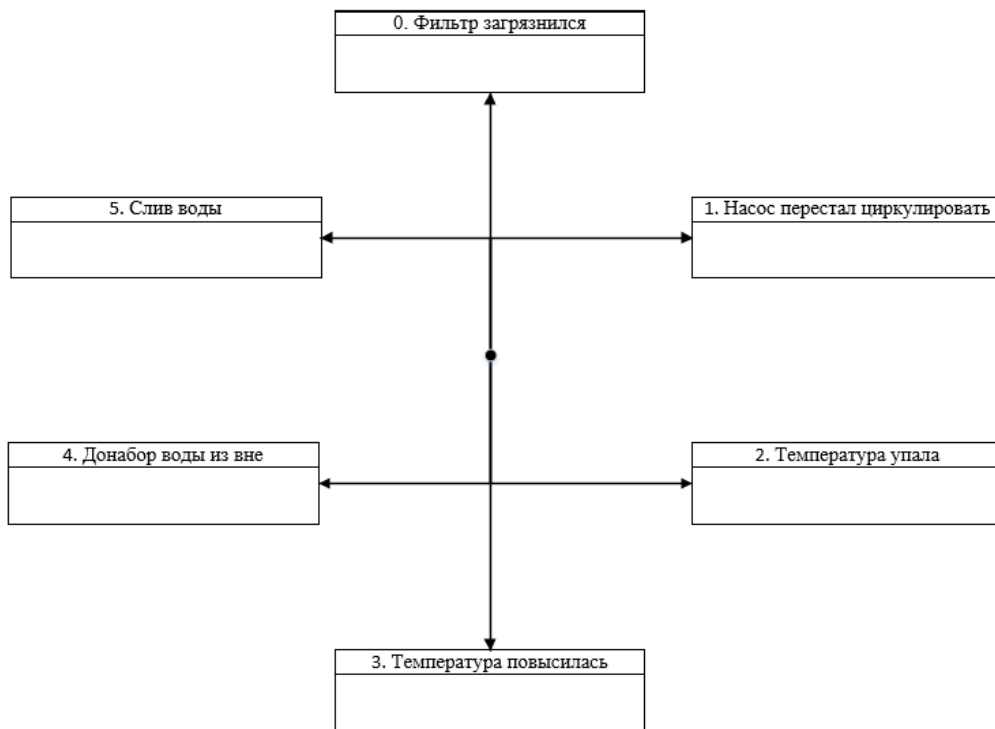


Рис. 4. Представление программного кода в виде алгоритма (блок-схемы)
Fig. 4. Representation of program code in the form of an algorithm (block-diagram)

Результаты

Если взглянуть на полученную схему графов переходов, то можно заметить, что каждое состояние это графическое обозначение состояний case; стрелки между состояниями это взаимосвязи состояний из какого в какое оно может переходить и какие переходят в него. Дроби на стрелках имеют вверху условия и внизу последствия переходов между состояниями. Взяв за основу написание технологического процесса в виде совокупности правил и переведя эти правила в совокупность состояний, можно разработать систему управления, обладая минимальными знаниями в программировании [8].

Таким образом процесс разработки системы управления будет представлять собой конвертацию информации из одного представления в другое. Разработка программного обеспечения на базе такой методики из процесса построения принципиально новой совокупности правил работы уже известной системы, реализуемой последовательностью логических конструкций превращается в преобразование существующей и проверенной информации в язык понятный вычислительным средствам системы. Преобразование, передача и чтение информации были базовыми понятиями развития любой информационной деятельности, но для осуществления обработки информации необходим понятный язык и набор правил для работы с ней. Так как при помощи простого и понятного словаря можно распространить язык и сделать его популярным, а в век информационных технологий именно владение информацией дает человеку как контроль над ситуацией, так и возможность дальнейшего развития [9].

Заключение

Автоматное программирование, как методика, содержит в себе совокупность инструментов для ее функционирования, а именно: компьютерные модели, входящие в структуру этой системы. Словарь понятий это модель, направленная на развитие автоматного программирования путем его популяризации и обучения его азам, реализованная в виде совокупности правил составления графов переходов – графического и символического представления программного кода и логики свитч-технологии. Словарь понятий как компьютерная модель позволяет как расширять методы автоматного программирования, так и популяризовать эти методы [10].

Автоматное программирование, обладая простотой и универсальностью, позволяет, при ее использовании, упростить и ускорить процесс разработки систем управления для различного рода умных устройств. Автоматное программирование, как методика, в первую очередь, рассчитана на производственных специалистов, имея целью уменьшение временных и материальных затрат на разработку систем управления, однако эта методика так же подойдет и любым желающим расширить свои знания в программировании. Создание программных продуктов для умных устройств методами автоматного программирования направлено на развитие Индустрии 4.0. и непрерывно связаного с этим понятием – понятие «Века информационных технологий».

Список источников:

1. Махлин М.Д., Аквариумный сад – М.: Природа, 1998. – 210 с.
2. Барей К.Т., Васильева Н.А. и др. Комнатный аквариум: Под ред. Пешкова М.А. – 3-е изд. – Алмата: Кайнар, 1965. – 180 с.
3. Канжелев С.Ю., Шалыто А.А. Преобразование графов переходов, представленных в формате MSVisio, в исходные коды программ для различных языков программирования (инструментальное средство MetaAuto) / Национальный исследовательский университет институт точной механики и оптики. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2005. – 102 с.

References:

1. Makhlin M.D. Aquarium Garden. Moscow. Priroda; 1998.
2. Barey KT, Vasilyeva NA, et al, Peshkova MA, editor. Indoor Aquarium. 3rd ed. Alma-Ata: Kainar; 1965.
3. Kanzhelev S.Yu., Shalyto A.A. Conversing Transition Graphs Presented in MSVisio Format Into Source Codes of Programs for Various Programming Languages (MetaAuto Tool). National Research University Institute of Precision Mechanics and Optics. Saint Petersburg: ITMO; 2005.

4. Шалыто А.А. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов / Национальный исследовательский университет институт точной механики и оптики. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2005. – 779 с.

5. Normand V., Exertier D., «Model-driven systems engineering: SysML & the MDSysE approach at Thales», in «Model Driven Engineering for distributed real-time embedded systems», John Wiley & Sons, Sept. 2005

6. Татарчевский В.А. Switch – технология в задачах логического управления // Программные продукты и системы №5. – 2006. – С. 30-32.

7. Шалыто А.А., Туккель Н.И. Switch-технология – автоматный подход к созданию программного обеспечения «реактивных» систем // Программирование. – №5. – 2001. – С. 45-62.

8. Липкин Е. ИНДУСТРИЯ 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции. – М.: ООО «Остек-СМТ», 2017. – 224 с.

9. Шалыто А.А. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. – СПбГУ ИТМО, – 1998. – 55 с.

10. Поликарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование. Учебно-методическое пособие. – СПбГУ ИТМО, – 2007. – 108 с.

4. Shalyto A.A. Methods of Hardware and Software Implementation of Algorithms. National Research University Institute of Precision Mechanics and Optics. Saint Petersburg: ITMO; 2005.

5. Normand V, Exertier D. Model-Driven Systems Engineering: SysML& the MDSysE Approach at Thales. In: Model Driven Engineering for Distributed Real-Time Embedded Systems. John Wiley & Sons; Sept. 2005.

6. Tatarchevsky V.A. Switch – Technology in Logical Control Problems. Software Products and Systems. 2006;5:30-32.

7. Shalyto A.A., Tukkel N.I. Switch Technology. An Automatic Approach to Developing Software for Reactive Systems. Programming. 2001;5:45-62.

8. Lipkin E. INDUSTRY 4.0: Smart Technologies are a Key Element in Industrial Competition. Moscow: Ostek-SMT; 2017.

9. Shalyto A.A. Algorithmization and Programming of Logical Control Problems. ITMO University; 1998.

10. Polikarpova N.I., Shalyto A.A. Automatic Programming. ITMO University; 2007.

Информация об авторах:

Гумунюк Павел Васильевич

аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Шурпо Александр Николаевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, ORCID ID: 0000-0003-1962-1969

Information about the authors:

Gumunyuk Pavel Vasilievich

postgraduate student of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

Shurpo Alexander Nikolayevich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, ORCID ID: 0000-0003-1962-1969

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

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

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 25.04.2024; принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 03.05.2024.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.(04+07)+005

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-12-18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

Дмитрий Олегович Сорока^{1✉}, Татьяна Владимировна Карлова²

^{1, 2} Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия

¹ dmitrysoroka96@gmail.com

² karlova-t@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам совершенствования качества технологической среды. Рассмотрены такие вопросы как: направления системного подхода к совершенствованию качества технологической среды, ключевые факторы, влияющие на оценку текущего состояния технологической среды. Цель исследования – это определение эффективных методик и подходов к совершенствованию технологической среды. Для достижения поставленной цели выбран метод стратегического планирования SWOT-анализ, на основе которого составлена стратегия и цели компании. Научная новизна состоит в определении подходов к совершенствованию технологической среды, влияния автоматизации на изменение технологической среды и возможные пути оптимизации производственных процессов. В качестве входных данных для исследования были выбраны следующие критерии: оценка текущего состояния технологической среды, SWOT-анализ компании. Выходными данными будут являться грамотно выстроенная стратегия и поставленные цели компании.

Ключевые слова: моделирование технологической среды, автоматизация, оценка текущего состояния технологической среды, уровень инновационности компании, уровень безопасности и защищенности технологической инфраструктуры, SWOT-анализ, стратегия компании, цели компании

Для цитирования: Сорока Д.О., Карлова Т.В. Моделирование технологической среды в условиях автоматизации технологий предприятия // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 12-18. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-12-18.

Original article

Open Access Article

MODELLING THE TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT IN THE CONDITIONS OF AUTOMATING THE ENTERPRISE TECHNOLOGIES

Dmitry O. Soroka^{1✉}, Tatyana V. Karlova²

^{1, 2} Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia

¹ dmitrysoroka96@gmail.com

² karlova-t@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the issues of improving the technological environment quality. The paper considers directions of a systematic approach to improving the technological environment quality, key factors influencing the assessment of the current state of the technological environment. The aim of the study is to identify effective methods and approaches to improving the technological environment. To achieve this aim, SWOT analysis which is the strategic planning method is chosen, on the basis of which the company's strategy and goals are drawn up. Scientific novelty lies in identifying approaches to improving the technological environment, the impact of automation on changes in the technological environment and possible ways to optimize production processes. Such criteria as assessing the current state of the technological environment, the company's SWOT analysis are selected as the input data for the study. The output data will be the company's well-structured strategy and set goals.

Keywords: modelling the technological environment, automation, assessment of the current state of the technological environment, level of the company's innovation, safety and security level of the technological infrastructure, SWOT analysis, company's strategy, company's goals

For citation: Soroka D.O., Karlova T.V. Modelling the technological environment in the conditions of automating the enterprise technologies. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 12-18. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-12-18.

Введение

Совершенствование качества технологической среды – это важный фактор развития как отдельно взятой компании, так и любой отрасли в целом. Совершенствование требует системный подход, который обеспечит снижение издержек в компании и повысит устойчивость и стабильность его функционирования. Для совершенствования качества технологической среды характерна автоматизация технологий и внедрение инноваций.

Модернизация технологической среды включает в себя несколько тенденций:

- 1) оценка текущего состояния технологической среды. Оценка позволяет выявить сильные и слабые стороны компании и определить потенциальные направления совершенствования;
- 2) определение конкретных целей в достижении высокой производительности и надежности разработки технологических процессов;
- 3) поддержание работоспособности технологической среды и оперативное реагирование на возникающие ошибки;
- 4) проведение работ по повышению квалификации работников компании в области новых технологий и лучших практик;
- 5) разработка документации системы менеджмента качества;
- 6) анализ достигнутых результатов с поставленными целями и внесение изменений в разработанную стратегию;
- 7) постоянное улучшение процессов путем внедрения инноваций в технологическую среду;
- 8) автоматизация рутинных процессов с помощью роботов-манипуляторов и другого ПО.

Оценка текущего состояния технологической среды

Оценка текущего состояния технологической среды позволяет определить насколько эффективно компания использует существующие технологии и спрогнозировать развитие технологической среды.

В данной статье рассматриваются несколько ключевых факторов, которые влияют на оценку текущего состояния технологической среды.

Первый фактор – это уровень приспособленности и доступности технологий. Мир технологий постоянно развивается. Компаниям необходимо постоянно повышать квалификацию персонала в области работы современными технологиями. Не следить за развитием и повышением квалификации – значит отстать и уступить место конкурентам.

Вторым фактором является уровень инновационного развития компании. Компания должна постоянно стремиться к внедрению новшеств и ориентироваться на технологическое и методологическое обновление своих процессов. Основными методами инновационного развития являются:

- формирование подразделений, занимающихся исследовательскими задачами;
- привлечение консалтинга для развития инновационных проектов;
- участие в конференциях об инновационных технологиях.

Третий фактор – это уровень защищенности технологической инфраструктуры от хакеров и вредоносных программ. Руководители компаний обязаны принимать меры по устранению любых уязвимостей и рисков.

SWOT-анализ – это одна из эффективных методик оценки текущего состояния технологической среды. Данный метод позволяет оценить сильные и слабые стороны компании, а также возможности и угрозы.

Аббревиатура SWOT расшифровывается как:

- Strengths (сильные стороны) – преимущества товара, услуги или бренда в целом, которые отличают компанию от конкурентов. Например, исключительно качественный товар или

новый продукт, которого еще не было на рынке.

– Weaknesses (слабые стороны) – недостатки продукции или бренда. Например: неразвитая логистика, срыв сроков доставки.

– Opportunities (возможности) – внешние факторы, события, которые компания может использовать для своего развития. Например: найм более квалифицированных работников.

– Threats (угрозы) – потенциальные угрозы и негативные факторы, которые никак не зависят от компании. Например: финансовый кризис.



Рис. 1. SWOT-анализ
Fig. 1. SWOT

Оценка текущего состояния технологической среды на практике

С целью оценки текущего состояния технологической среды возьмем абстрактную компанию по разработке программных решений ООО «ИТ-Цифровые Решения». ООО «ИТ-Цифровые Решения» молодая компания, датой основания которой является 2017 год. Продуктовая линейка компании уже насчитывает 14 программных решений. Клиентами компании являются как средние организации, так и крупные компании и холдинги. Штат работников компании в 2024 году превысил 5000 человек.

Применим для оценки текущего состояния технологической среды компании методику SWOT-анализа.

1. Сильные стороны:

- динамично развивающаяся компания;
- высококвалифицированные разработчики;
- развитая инфраструктура и доступ к современному оборудованию;
- патенты в сфере технологий;
- большая клиентская база.

2. Слабые стороны:

- трудности с продвижением своих технологий на рынке;
- стратегические решения в компании принимаются слишком долго;
- ограниченный бюджет на исследования и разработки;
- отсутствие компетенций у работников компании в области стратегического планирования.

3. Возможности:

- увеличение спроса на инновационные решения;
- технологическое партнерство с другими компаниями;
- получение государственных грантов для поддержки исследований;
- увеличение заинтересованности компаний в цифровизации и автоматизации.

4. Угрозы:

- конкуренция на рынке;
- изменение законодательства, которое отразится на деятельности компании;
- технические риски.

По результатам SWOT-анализа необходимо разработать стратегию компании. Стратегия должна включать в себя:

- привлечение новых клиентов и продвижение своих технологических продуктов;
- повышение гибкости в управлении и быстроты в принятии решений;
- увеличение исследований в области информационных технологий;
- развитие стратегического партнерства;
- внедрение и развитие современных информационных технологий;
- обеспечение соблюдения требований законодательства;
- инвестирование в системы безопасности компании;
- разработка планов по снижению затрат компании.

Установка четких целей. Проведя оценку текущего состояния технологической среды на основе SWOT-анализа и разработав стратегию, руководству компании необходимо поставить четкие цели для создания эффективной и совершенной технологической среды. Цели должны быть конкретными, измеримыми, достижимыми, релевантными и ограниченными по времени.

В нашем примере руководство компании ООО «IT-Цифровые Решения» на основе SWOT-анализа и выработки стратегии определило следующие цели:

Цель № 1. Улучшить безопасность технологической среды путем внедрения двухфакторной аутентификации и системы мониторинга утечек данных. Срок: 01.07.2024 г. Результат: внедренные системы двухфакторной аутентификации и мониторинга утечек данных.

Цель № 2. Снижение затрат в обслуживании технологической инфраструктуры на 10 %. Срок: 01.08.2024 г. Результат: переход на облачные сервисы и виртуализацию.

Цель № 3. Повышение лояльности пользователей технологической среды на 15 %. Срок: 25.12.2024 г. Результат: более быстрый и надежный доступ к IT-ресурсам.

Для каждой цели должен быть разработан план мероприятий по достижению данной цели. В плане мероприятий должны быть отражены:

- 1) необходимые ресурсы для каждого мероприятия;
- 2) ответственные лица;
- 3) сроки выполнения мероприятий.

План мероприятий для достижения цели № 1:

1. Проанализировать существующие на рынке сервисы двухфакторной аутентификации и системы мониторинга утечек данных. Необходимые ресурсы: актуальная информация о программных решениях. Ответственные лица: отдел аналитики, отдел информационной безопасности, финансовый отдел. Срок: 14 рабочих дней.

2. Протестировать и установить подходящее программное обеспечение на устройствах организации. Необходимые ресурсы: оборудование для тестирования, документация и техническая поддержка по установке программного обеспечения. Ответственные лица: отдел информационной безопасности. Срок: 30 рабочих дней.

3. Провести обучение работников компании по использованию сервиса двухфакторной аутентификации. Необходимые ресурсы: обучающие материалы по использованию

программного обеспечения. Ответственные лица: отдел корпоративного обучения, финансовый отдел. Срок: 14 рабочих дней.

План мероприятий для достижения цели № 2:

1. Провести аудит технологической инфраструктуры. Необходимые ресурсы: технологическая инфраструктура, бюджет на проведение аудита. Ответственные лица: отдел аналитики, IT-инженеры. Срок: 30 рабочих дней.

2. Составить предложения по оптимизации затрат. Необходимые ресурсы: отчет по аудиту технологической инфраструктуры. Ответственные лица: отдел аналитики, IT-инженеры. Срок: 14 рабочих дней.

3. Провести анализ облачных сервисов и возможности их применения в организации. Необходимые ресурсы: актуальная информация об облачных сервисах, аналитические платформы. Ответственные лица: технический директор, отдел аналитики, отдел информационной безопасности, финансовый отдел, отдел облачной архитектуры. Срок: 30 рабочих дней.

4. Разработать план миграции инфраструктуры на облачные сервисы. Необходимые ресурсы: отчет о проведенном анализе облачных сервисов. Ответственные лица: технический директор, отдел информационной безопасности, финансовый отдел, отдел облачной архитектуры. Срок: 45 рабочих дней.

5. Перенос «сетевого» оборудования на виртуальные платформы. Необходимые ресурсы: отчет о проведенном анализе виртуальных платформ. Ответственные лица: технический директор, отдел информационной безопасности, финансовый отдел, отдел облачной архитектуры. Срок: 45 рабочих дней.

6. Тестирование новой инфраструктуры для выявления ошибок. Необходимые ресурсы: оборудование для тестирования, документация и техническая поддержка по использованию программного обеспечения. Ответственные лица: технический директор, отдел информационной безопасности, отдел облачной архитектуры. Срок: 60 рабочих дней.

7. Провести обучение работников по использованию облачных сервисов и средств виртуализации. Необходимые ресурсы: учебные классы с оборудованием для обучения, обучающие материалы по использованию программного обеспечения, обученный преподавательский состав. Ответственные лица: отдел корпоративного обучения, финансовый отдел. Срок: 30 рабочих дней.

8. Предоставить работникам компании техническую поддержку по вопросам функционирования новой системы. Необходимые ресурсы: служба технической поддержки, база знаний, руководства пользователя. Ответственные лица: технический директор, отдел корпоративного обучения, системные администраторы, отдел облачной архитектуры. Срок: 243 рабочих дня.

9. Проанализировать результаты выполненных работ. Необходимые ресурсы: техническое задание на переход инфраструктуры на облачные сервисы и средства виртуализации, отчеты о выполненных работах. Ответственные лица: технический директор, отдел аналитики, отдел облачной архитектуры. Срок: 30 рабочих дней.

План мероприятий для достижения цели №3:

1. Провести аудит технологической среды для выявления слабых мест. Необходимые ресурсы: технологическая среда, бюджет на проведение аудита. Ответственные лица: отдел аналитики, IT-инженеры. Срок: 30 рабочих дней.

2. Провести опрос для выявления ожиданий работников. Необходимые ресурсы: Подготовленные опросные листы. Ответственные лица: отдел аналитики, IT-инженеры. Срок: 10 рабочих дней.

3. Разработать план работ по совершенствованию оборудования. Необходимые ресурсы: отчет по аудиту технологической среды. Ответственные лица: IT-директор, отдел аналитики, отдел информационной безопасности, финансовый отдел, проектный менеджер. Срок: 45 рабочих дней.

4. Утвердить бюджет на проведение работ. Необходимые ресурсы: план по

совершенствованию доступа к IT-ресурсам. Ответственные лица: генеральный директор, IT-директор, директор по экономике и финансам, финансовый отдел, проектный менеджер. Срок: 10 рабочих дней.

5. Провести работы по установке нового оборудования. Необходимые ресурсы: подготовленное новое оборудование. Ответственные лица: IT-директор, отдел информационной безопасности, IT-инженеры. Срок: 45 рабочих дней.

6. Провести обучение для IT-специалистов. Необходимые ресурсы: учебные классы с оборудованием для обучения, обучающие материалы по использованию программного обеспечения. Ответственные лица: отдел корпоративного обучения, финансовый отдел. Срок: 30 рабочих дней.

7. Проанализировать результаты выполненных работ по предоставлению быстрого и надежного доступа к IT-ресурсам. Необходимые ресурсы: техническое задание по предоставлению быстрого и надежного доступа к IT-ресурсам, отчеты о выполненных работах. Ответственные лица: IT-директор, отдел аналитики. Срок: 30 рабочих дней.

Заключение

Рассмотренные в данной статье тенденции и подходы направлены на повышение эффективности функционирования предприятия. Моделирование технологической среды требует системного подхода, который включает в себя оценку текущего состояния компании, ее потенциала на рынке, разработку стратегии и целей развития, а также их реализацию. Методы моделирования помогают оптимизировать процессы компании, улучшать качество выпускаемой продукции, снижать затраты.

Моделирование технологической среды имеет свои преимущества и недостатки, но оно является важным инструментом для улучшения эффективности компаний. Правильно выбранный метод стратегического планирования поможет сэкономить немалые финансовые и человеческие ресурсы, а также задаст вектор развития компании на ближайшие годы.

Список источников:

1. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высш. шк., 2004. – 415 с.
2. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов и др. – М.: Наука, 2003. – 219 с.
3. Проектирование единого информационного пространства виртуальных предприятий / А.Г. Схиртладзе, А.В. Скворцов и др. – М.: Берлин: Директ-Медиа, 2017. – 616 с.
4. Катаев А.В. Виртуальные бизнес-организации. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2009. – 120 с.
5. Виртуальное предприятие как инновация в сфере организации бизнеса / П.Ф. Юрчик, О.И. Максимычев и др. // Наука и бизнес: пути развития. – 2018. – №. 6(84). – С. 135–138.
6. Золотухина Ю.В., Адаменко А.А., Крыжановская О.А. Выбор стратегии трансформации бизнеса организациями - участниками информационного взаимодействия в условиях цифровой экономики DOI: 10.24412/2309-4788-2021-537-116-123
7. Ткалич Татьяна Алексеевна Механизмы повышения эффективности цифровых бизнес-моделей // Управление цифровой трансформацией бизнеса / Коллективная монография. – Минск – 2022. – 217-254 с.

References:

1. Kapustin NM, Kuznetsov PM, Skhirtladze AG, et al. Kapustina NM, editor. Automation of Production Processes in Machine-Building. Moscow: Vysshaya Shkola; 2004.
2. Solomentsev YuM, Mitrofanov VG, et al. Information-Computer Systems in Mechanical Engineering CALS-Technologies. Moscow: Nauka; 2003.
3. Skhirtladze AG, Skvortsov AV, et al. Designing a Single Information Space for Virtual Enterprises. Moscow: Berlin: Direct-Media; 2017.
4. Kataev A.V. Virtual Business Organizations. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2009.
5. Yurchik PF, Maksimychev OI, et al. Virtual Enterprise as an Innovation in the Field of Business Organization. Science and Business: Ways of Development. 2018;6(84):135-138.
6. Zolotukhina Yu.V., Adamenko A.A., Kryzhanovskaya O.A. Choice of Business Transformation Strategy by Organizations –Participants of Information Interaction in the Digital Economy. Natural-Humanitarian Studies. 2021;37(5):116-123. doi: 10.24412/2309-4788-2021-537-116-123
7. Tkalich T.A. Mechanisms for Increasing the Efficiency of Digital Business Models. Management of Digital Business Transformation. Minsk; 2022.

8. Nolan R. L. Managing the crises in data processing. Harvard Business Review. [Электронный ресурс]. URL: <https://hbr.org/1979/03/managing-the-crisis-in-data-processing>.

9. Kane G.C., Palmer D., Phillips, A.N. et al. Achieving digital maturity. Adapting your company to a changing world. research report. MIT Sloan Manag. [Электронный ресурс]. URL: <https://sloanreview.mit.edu/projects/achieving-digital-maturity>.

10. Кричевский М.Л., Мартынова Ю.А. Выбор варианта развития предприятия методами машинного обучения // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – № 2. – с. 1099-1110.

11. Абдрахманова Г.И., Вишневский К.О., Гохберг Л.М. и др. Цифровая трансформация: ожидания и реальность. - М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. – 221 с.

8. Nolan R. L. Managing the Crises in Data Processing. Harvard Business Review [Internet]. Available from: <https://hbr.org/1979/03/managing-the-crisis-in-data-processing>

9. Kane GC, Palmer D, Phillips AN. et al. Achieving Digital Maturity. Adapting Your Company to a Changing World. Research report. MITSloanManag [Internet]. Available from: <https://sloanreview.mit.edu/projects/achieving-digital-maturity>

10. Krichevsky M.L., Martynova Yu.A. Selection of the Company Development Option Using Machine Learning Methods. Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki. 2022;2:1099-1110.

11. Abdrakhmanova GI, Vishnevsky KO, Gokhberg LM, et al. Digital Transformation: Expectations and Reality. Moscow: Higher School of Economics Publishing House; 2022.

Информация об авторах:

Сорока Дмитрий Олегович

аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, старший аналитик отдела методологии дирекции по развитию бизнеса ПАО Группа Астра

Карлова Татьяна Владимировна

доктор социологических наук, кандидат технических наук Профессор Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Information about the authors:

Soroka Dmitry Olegovich

postgraduate student of the Institute for Design-Technological Informatics RAS, Senior analyst of the methodology department of the business development directorate of PJSC Astra Group

Karlova Tatyana Vladimirovna

Doctor of Sociological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Institute for Design-Technological Informatics RAS

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

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

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 20.05.2024.

The article was submitted 22.04.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 20.05.2024.

Рецензент – Федяева Г.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Fedyaeva G.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.02

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-19-24

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ КАЛИБРОВКИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

Андрей Владимирович Аверченков¹, Владимир Жанович Куклин²,
Леонид Михайлович Червяков³, Алексей Александрович Шабанов⁴

^{1, 2, 3} Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г. Москва, Россия

⁴ ООО "ЭРГА" г. Калуга, Россия

¹ mahar@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0196-1332>

² vzh.kuklin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1962-1969>

³ chlm@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2310-8992>

⁴ aashabanov86@mail.ru

Аннотация. Статистические параметры отказов сборочного оборудования различных предприятий автомобилестроительной отрасли, работающих в схожих условиях, не отличаются между собой, что говорит о необходимости анализа и поиска общих решений поставленных проблем. При планировании периодичности калибровки нового сборочного оборудования можно использовать статистику отказов уже существующих производств, в частности для калибровки момента затяжки в периодической проверке. Изложенные в статье материалы предполагают формализацию технологической подготовки производства в части обеспечения непрерывной сборки. В работе получено формальное описание для расчета расписания калибровки сборочного инструмента, расчетное время выхода момента затяжки за поле допуска, время для периодической калибровки инструмента и зависимости для оценки периодичности проверок. Представленные результаты могут быть использованы для построения АСТПП сборочных предприятий автомобильной промышленности, на их основе разработаны программно-технические решения.

Ключевые слова: сборочное оборудование, математическая модель, управляющий алгоритм, автомобилестроительный кластер, период обслуживания инструмента

Для цитирования: Аверченков А.В., Куклин В.Ж., Червяков Л.М., Шабанов А.А. Формализация процедуры калибровки инструмента для технологической подготовки сборочного производства в автомобилестроении // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 19-24. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-19-24.

Original article

Open Access Article

FORMALIZING THE TOOL CALIBRATION PROCEDURE FOR THE TECHNOLOGICAL PREPARATION OF ASSEMBLY PRODUCTION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Andrey V. Averchenkov¹, Vladimir Z. Kuklin², Leonid M. Chervyakov³, Alexey A. Shabanov⁴

^{1, 2, 3} Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia

⁴ ERGA LLC, Kaluga, Russia

¹ mahar@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0196-1332>

² vzh.kuklin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1962-1969>

³ chlm@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2310-8992>

⁴ aashabanov86@mail.ru

Abstract. *The statistical parameters of failing assembly equipment of various automotive industry enterprises operating under similar conditions do not differ from each other, this fact indicates the need to analyze and find common solutions to the problems posed. When planning the calibration frequency of new assembly equipment, failure statistics from existing production facilities can be used, in particular for calibrating the tightening torque in periodic inspection. The materials presented in the article assume formalizing technological preparation of production in terms of ensuring continuous assembly. The paper provides a formal description for calculating the calibration schedule of an assembly tool, the estimated time for the tightening torque to exceed the tolerance range, the time for periodic calibration of the tool and the dependencies for evaluating the frequency of checks. The presented results can be used to build computer-aided process planning for assembly plants in the automotive industry; software and hardware solutions are developed on their basis.*

Keywords: assembly equipment, mathematical model, control algorithm, automotive cluster, tool maintenance period

For citation: Averchenkov A.V., Kuklin V.Zh., Chervyakov L.M., Shabanov A.A. Formalizing the Tool Calibration Procedure for the Technological Preparation of Assembly Production in the Automotive Industry. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24), pp. 19-24. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-19-24.

Введение

В настоящее время многие сборочные предприятия страны в области как общего машиностроения, так и автомобилестроения в частности, проводят внутренний аудит сборочного оборудования для поиска способов оптимизации себестоимости через снижение времени простоя при настройке сборочного оборудования. Ряд технических задач не имеют традиционного решения, требуется их научное осмысление и формализация расчетов для снижения отказов оборудования.

Постановка задачи

Практика показывает, что статистические параметры отказов оборудования различных предприятий автомобилестроительной отрасли, работающих в схожих условиях, не отличаются между собой [1, 2]. Поэтому, при планировании периодичности калибровки нового сборочного оборудования целесообразно проанализировать статистику отказов уже существующих производств. Одним из элементов настройки оборудования является калибровка момента затяжки в периодической проверке. Время между двумя калибровками момента затяжки (периодичность калибровки) – T_{Pi} для i -х моделей инструментов целесообразно выбирать с использованием данных уже функционирующих производств, в которых используются i -е модели инструментов. Производственная статистика показывает, что скорость разрегулирования инструментов в период приработки и в период нормального функционирования практически не изменяется. Таким образом, нет необходимости изменять период T_{Pi} в ходе эксплуатации. Данная величина может сохраняться на протяжении всего времени нормального функционирования сборочного инструмента. В рамках данной статьи рассматриваются вопросы расчетных методик временных периодов между калибровками инструмента и оценки периодичности проверок.

Материалы и методы решения задачи

Используем скорость разрегулирования как определяющий параметр при выборе метода определения периодичности проверок. Скорость разрегулирования между двумя последовательными калибровками инструмента может быть описана следующей формулой:

$$C_{n,n-1} = \frac{M_n - M_{n-1}}{t_{n,n-1}} \quad (1)$$

где $C_{n,n-1}$ – скорость разрегулирования между $n-1$ -й и n -й калибровками инструмента; M_n – значение момента затяжки инструмента измеренное при n -й калибровке; M_{n-1} – значение момента затяжки инструмента, измеренное при $n-1$ -й калибровке; $t_{n,n-1}$ – время между $n-1$ -й и n -й калибровками инструмента.

Производственная статистика показывает, что для того, чтобы получить значение C , на основании которого можно составить достоверное представление о тенденции изменения момента затяжки во времени, требуется не менее 100 рабочих смен.

Среднее значение скорости разрегулирования \bar{C} между калибровками инструмента с учетом модели, определяется по критерию наилучшей аппроксимации кривой измерений линейной функцией. Поскольку линейная функция описывается выражением $y = ax + b$, аппрокси-

мация заключается в отыскании коэффициентов a и b уравнения таких, чтобы все экспериментальные точки лежали наиболее близко к аппроксимирующей прямой. Применим для аппроксимации метод наименьших квадратов. Находим частные производные функции $F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$ по переменным a и b , которые приравняются к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a,b)}{\partial a} = 0; \\ \frac{\partial F(a,b)}{\partial b} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений при этом имеет следующий вид:

$$\begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))x_i = 0; \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b)) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

После преобразования получаем:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (4)$$

Значение момента затяжки j -го сборочного инструмента измеренное при z -й калибровке:

$$M_{jz} = \bar{C}_j t_{jz} + M_{j0}, \quad (5)$$

где M_{jz} – значение момента затяжки j -го сборочного инструмента измеренное при z -й калибровке; M_{j0} – настраиваемое значение момента затяжки j -го сборочного инструмента; \bar{C}_j – средняя скорость разрегулирования j -го сборочного инструмента; t_z – время проведения z -й калибровки j -го сборочного инструмента.

В выражении (5) $M_{j0} = \text{const}$, поэтому для нахождения C_j достаточно решить первое уравнение системы (4), подставив в него соответствующие значения. Решив полученное уравнение:

$$\bar{C}_j \sum_{z=1}^n t_z^2 + M_{j0} \sum_{z=1}^n t_z = \sum_{z=1}^n t_z M_{jz}, \quad (6)$$

получим значение \bar{C}_j :

$$\bar{C}_j = \frac{\sum_{z=1}^n t_z M_{jz} - M_{j0} \sum_{z=1}^n t_z}{\sum_{z=1}^n t_z^2}. \quad (7)$$

Расписание проверок должно обеспечивать выполнение калибровки оборудования до достижения им значений $M_{j\text{max}}$ – максимальное значение момента затяжки j -го сборочного инструмента допускаемое параметрами технологического процесса или $M_{j\text{min}}$ – минимальное значение момента затяжки j -го сборочного инструмента допускаемое параметрами технологического процесса.

Время выхода за поле допуска момента затяжки j -го сборочного инструмента $T_{\Gamma j}$ может быть найдено из выражения:

$$T_{\Gamma j} = \min \left\{ \frac{M_{j\text{max}} - M_{j0}}{|\bar{C}_j|}, \frac{M_j - M_{j\text{min}}}{|\bar{C}_j|} \right\}. \quad (8)$$

Промежуток времени между двумя калибровками момента затяжки сборочного инструмента, т.е. периодичность контроля момента затяжки, должен удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{cases} T_{\Pi} \rightarrow T_{\Gamma}; \\ T_{\Pi} < T_{\Gamma}, \end{cases} \quad (9)$$

где T_{Π} – время между двумя калибровками момента затяжки сборочного инструмента.

В реальном производстве разрегулирование многих типов и моделей сборочных инструментов может быть практически равным нулю [3]. В этом случае для определения оптимального периода проверок следует применять вероятностный подход, использующий характеристики надежности инструмента. Предлагается в качестве такой характеристики использовать время наработки на отказ T_0 . Сборочный инструмент, в том числе используемый в конвейерной сборке, является достаточно сложным оборудованием, поэтому для описания отказов в качестве модели может быть использован экспоненциальный закон распределения. Предлагается путем перехода от реального времени к виртуальному (при котором производственные потери в расчетах интерпретируются как линейное время простоя), адаптировать и усовершенствовать ранее полученные методические подходы для нахождения оптимального периода контроля момента затяжки сборочных инструментов [5].

Постановку задачи для ее поэтапного решения поясняет рис. 1.

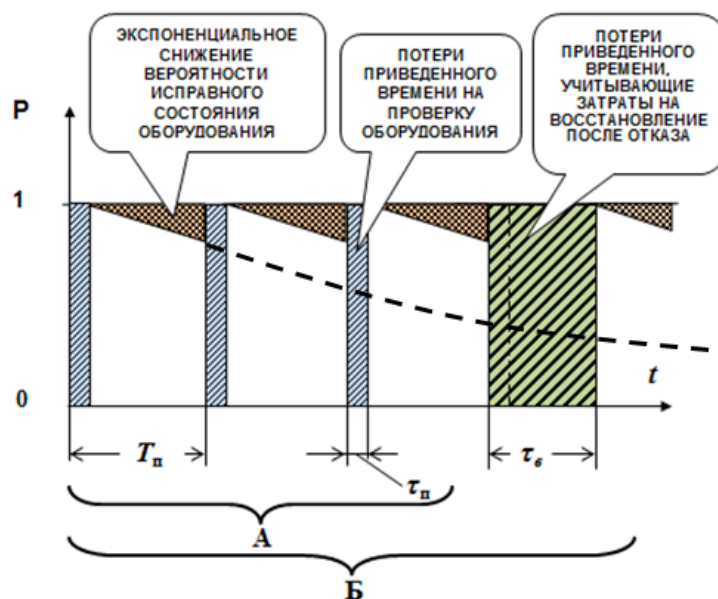


Рис. 1. Изменение вероятности безотказной работы сборочного инструмента во времени в циклах контроля и восстановления

Fig. 1. Change in the probability of failure-free operation of an assembly tool over time in control and recovery cycles

Здесь участок А соответствует классической задаче Барлоу-Хантера-Прошана, в которой для экспоненциального распределения вероятности безотказной работы оборудования характеризующейся известной интенсивностью отказов λ и известной длительностью среднего времени проверки $\tau_{\text{п}}$ равной времени восстановления $\tau_{\text{в}} = \tau_{\text{в}}$ отыскивается оптимальный период периодического контроля $T_{\text{п}}$, при котором обеспечивается максимально возможный коэффициент готовности оборудования $K_{\text{г}}$.

Участок Б поясняет постановку задачи более точно моделирующей функционирование совокупности сборочного оборудования для случая $\tau_{\text{п}} \neq \tau_{\text{в}}$. Обнаруженный отказ, в автомобильном производстве часто сопряжен с перепроверкой партии или даже отзывом партии, выпущенной с момента предшествующей проверки. Таким образом, приведенное время восстановления $\tau_{\text{в}}$, учитывающее указанные производственные затраты, значительно превышает время проверки сборочного инструмента $\tau_{\text{п}}$.

Поскольку коэффициент готовности соответствует вероятности нахождения оборудования в исправном состоянии, задача оптимизации периода проверок сводится к нахождению $T_{\text{п}}$ проверок минимизирующего площадь потерь на рис. 1.

Для модели Барлоу-Хантера-Прошана оптимальной периодичностью проверок, при известной интенсивности отказов сборочного оборудования λ и длительности проверок $\tau_{\text{п}}$, является, обеспечивающее минимизацию потерь, решение уравнения (10):

$$e^{\lambda t} - \lambda t = 1 + \lambda \tau_{\text{п}}. \quad (10)$$

Для его решения осуществляется переход к относительным значениям оптимального периода проверок:

$$k_{\text{п}} = \lambda T_{\text{п}} = \frac{T_{\text{п}}}{T_0}. \quad (11)$$

Коэффициент периодичности $k_{\text{п}}$ является оптимальным периодом проверок, выраженным в долях времени наработки на отказ (T_0) инструмента, которое обычно декларируется производителем или может быть оценено расчетным методом, при наличии статистики отказов оборудования.

Используем разложение экспоненциальной функции в степенной ряд и запишем уравнение (10) в виде (11), где $x = \lambda t = \frac{t}{T_0}$. Тогда, его решением будет оптимальное значение $k_{\text{п}}$.

$$\frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots = \frac{\tau_{\text{п}}}{T_0}. \quad (12)$$

В практически значимых случаях $\tau_{\text{п}} \ll T_0$ и ряд в левой части уравнения будет быстро убывающим, поскольку во всех практических случаях $k_{\text{п}} \ll 1$. Поэтому для оценки $k_{\text{п}}$ можно

ограничиться первым членом ряда, получив оценочную формулу в виде:

$$k_{\pi} = \sqrt{2\tau_{\pi}/T_0}. \quad (13)$$

Для случая Б, когда затраты времени на восстановление значительно превышают длительность проверки, можно применить итерационный алгоритм, заменяя на очередном $i + 1$ -ом шаге:

$$\tau_{\pi,i+1} := \tau_{\pi} + \tau_{\text{в}}k_{\pi,i}, \quad (14)$$

где $k_{\pi,i}$ – значение k_{π} полученное на i -ом шаге итерации.

Полагая $k_{\pi,0} = 0$ при первом шаге, следует повторять вычисления по (13) и (14) в цикле, пока после очередного шага приращение Δt рассчитанного оптимального периода проверок T_{π} не станет меньше некоторой требуемой для условий производства порогового значения $\Delta T_{\text{порог}}$ точности определения периода калибровок (например 0,5 часа):

$$T_0(k_{\pi,i+1} - k_{\pi,i}) < \Delta T_{\text{порог}}. \quad (15)$$

Данный подход в достаточной степени учитывает экономические факторы и позволяет получить, с необходимой для производства точностью, оптимальную периодичность проверки оборудования [6]. Используя зависимость для расчета снижения коэффициента готовности, отражающего в нашем случае средние производственные потери, получим удобное для качественного анализа оценочное выражение для расчета коэффициента периодичности проверок k_{π} с учетом $\tau_{\text{в}}$:

$$k_{\pi} = \tau_{\text{в}}/T_0 + \sqrt{(\tau_{\text{в}}/T_0)^2 + 2\tau_{\pi}/T_0}, \quad (16)$$

при $\tau_{\text{в}} \rightarrow 0$ зависимость (16) обращается в (13), а при $\tau_{\text{в}} \gg \tau_{\pi}$ – стремиться к выражению:

$$k_{\pi} = \frac{2\tau_{\text{в}}}{T_0}. \quad (17)$$

Заключение

Проведенные исследования предполагают формализацию технологической подготовки производства в части обеспечения непрерывной сборки. В работе получено формальное описание для расчета расписания калибровки сборочного инструмента, расчетного времени выхода момента затяжки за поле допуска, время для периодической калибровки инструмента и зависимости для оценки периодичности проверок.

Представленные результаты могут быть использованы для построения АСТПП сборочных предприятий автомобильной промышленности, на их основе разработаны программно-технические решения.

Список источников:

1. Шабанов А.А. Решение задачи оптимизации частоты проверок параметров оборудования // Вопросы радиоэлектроники / Серия общетехническая (ОТ). – 2015. – № 6. – С. 105-114.
2. Шабанов А.А. Разработка методики рационального выбора структуры и состава запаса сборочных инструментов и приспособлений для системы обеспечения механической сборки // Вопросы радиоэлектроники / Серия общетехническая (ОТ). – 2015. – №6. – С. 115-124.
3. Шабанов А.А., Аверченкова Е.Э. Методика формирования оптимальной совокупности запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – №25 (4). – С. 201-219.
4. Шабанов А.А., Аверченкова Е.Э. Модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки предприятий автомобилестроительного кластера // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2022. – №26 (1). – С. 73-91.

References:

1. Shabanov A.A. Solution of the Optimization Problem of Equipment Parameters Inspection Frequency. Questions of Radio Electronics. General Technical Series. 2015;6:105-114.
2. Shabanov A.A. Development of Rational Choice Method of Structure and Composition of Spare Assembly Tools and Accessories for Mechanical Assembly System. Questions of Radio Electronics. General Technical Series. 2015;6:115-124.
3. Shabanov A.A., Averchenkova E.E. The Methodology for Creating the Optimal Set of Spare Equipment in the Organizational and Technological System for Providing Mechanical Assembly at the Enterprises of the Motor-Car Construction Cluster. Proceedings of the Southwest State University. 2021;25(4):201-219.
4. Shabanov A.A., Averchenkova E.E. Model and Methodology for Optimal Equipment Setting for Monitoring and Verification of Enterprises of the Automotive Cluster. Proceedings of the Southwest State University. 2022;26(1):73-91.

5. Шабанов А.А., Аверченкова Е.Э. Моделирование систем управления организационно-технологическим обеспечением механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – №. 3-4. – С. 58-67.

6. Шабанов А.А., Аверченкова Е.Э., Аверченков В.И. Модель и алгоритм управления совокупностью сборочного оборудования системы обеспечения механической сборки // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – №1. – С. 43-55.

7. Черкесов Г.Н. О расчете надежности обслуживаемых систем при ограниченном ЗИП с периодическим пополнением запасов. – М.: Надежность, № 2(5). – 2003.

8. Чуркин В.В. Оценка и оптимизация комплекта ЗИП с помощью метода статистического моделирования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2015. – № 2-3 (217-222). – С. 79-92.

9. Чечуга А.О. Особенности разработки технологических процессов автоматизированной и роботизированной сборки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 9. – С. 555-559.

10. Control System of Assembly Production Organizational and Technological System of Automotive Cluster Factories A.A. Shabanov and E.E. Averchenkova Published under licence by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 2091, 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2021) 4-7 October 2021, Astrakhan, Russian Federation Citation A A Shabanov and E E Averchenkova 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2091 012057

5. Shabanov A.A., Averchenkova E.E. Modeling of Control Systems for Organizational and Technological Support of Mechanical Assembly at Automotive Cluster Enterprises. Automation and Modeling in Design and Management. 2021;3-4:58-67.

6. Shabanov A.A., Averchenkova E.E., Averchenkov V.I. Model and Algorithm for Controlling a Set of Assembly Equipment for a Mechanical Assembly Support System. Automation and Modeling in Design and Management. 2022;1:43-55.

7. Cherkesov G.N. On Calculating the Reliability of the Serviced Systems with Limited Spare Parts and Periodic Replenishment of Supplies. Dependability. 2003;2(5).

8. Churkin V.V. Estimation and Optimization of Spare Parts Kits Using the Method of Statistical Modeling. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2015;2-3(217-222):79-92.

9. Chechuga A.O. Features of Development of Technological Processes of Automated and Robotized Assembly. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2019;9:555-559.

10. Shabanov A.A., Averchenkova E.E. Control System of Assembly Production Organizational and Technological System of Automotive Cluster Factories. In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2021); 2021 Oct 4-7; Astrakhan: Journal of Physics: 2021, vol. 2091, Conf. Ser. 2091 012057.

Информация об авторах:

Аверченков Андрей Владимирович

Ведущий научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, ORCID 0000-0003-0196-1332

Куклин Владимир Жанович

Ведущий научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, ORCID 0000-0003-1962-1969

Червяков Леонид Михайлович

Ведущий научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, ORCID 0000-0002-2310-8992

Шабанов Алексей Александрович

Ведущий инженер-технолог ООО "ЭРГА"

Information about the authors:

Averchenkov Andrey Vladimirovich

Leading Researcher at the Institute for Design-Technological Informatics RAS, ORCID: 0000-0003-0196-1332

Kuklin Vladimir Zhanovich

Leading Researcher at the Institute for Design-Technological Informatics RAS, ORCID: 0000-0003-1962-1969

Chervyakov Leonid Mikhailovich

Leading Researcher at the Institute for Design-Technological Informatics RAS, ORCID: 0000-0002-2310-8992

Shabanov Alexey Aleksandrovich

Leading process engineer at ERGA LLC

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 11.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.03.2024.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 656.073.7

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-25-34

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ СЕТИ ПОЛИГОНОВ СБОРА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Александр Анатольевич Лютоев¹ ✉, Елена Владимировна Хабаева²

^{1,2} Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

¹ allyutoev@yandex.ru

² ehabaeva@inbox.ru

Аннотация. Целью исследования является разработка алгоритма построения сети полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления на территории некоторого региона с учетом образуемой массы ТКО и имеющейся транспортной сети, позволяющего прийти к экономически оптимальному решению. Изложенные в научной литературе математические методы направлены на решение задач определения оптимального места расположения объектов логистической инфраструктуры – производственного предприятия, склада, распределительного центра, торговой точки. В работе сформулирован и реализован алгоритм построения оптимальной сети полигонов, которая обеспечила бы минимальные экономические затраты на логистику, строительство и эксплуатацию полигонов. Основными учитываемыми факторами являются: масса образуемых ТКО, стоимости перевозки от площадки временного накопления до полигона ТКО, расстояния между административными центрами. Основной принцип поиска экстремума логистики основывается на определении главного узла - узел с наибольшей массой ТКО по всем имеющимся дорожным развязкам и выбор местоположения полигона из условия максимальной разности годовых логистических затрат. С помощью предложенного алгоритма решена задача по определению количества и местоположению полигонов ТКО для южной части Республики Коми.

Ключевые слова: полигон твердых коммунальных отходов, мощность полигона, логистика, экономическая эффективность, оптимальное решение, маршрутный граф, цепь, узел

Для цитирования: Лютоев А.А., Хабаева Е.В. Алгоритм поиска оптимальной сети полигонов сбора твердых коммунальных отходов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 25-34. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-25-34.

Original article

Open Access Article

ALGORITHM FOR SEARCHING FOR AN OPTIMAL NETWORK OF POLYGONS FOR COLLECTING SOLID COMMUNAL WASTE

Alexander A. Lyutoev¹ ✉, Elena V. Khabaeva²

^{1,2} Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

¹ allyutoev@yandex.ru

² ehabaeva@inbox.ru

Abstract. The aim of the study is to develop an algorithm for constructing a network of polygons for storing, recycling and neutralizing industrial and consumer waste in a certain region, taking into account the generated mass of solid communal waste and the existing transport network, allowing one to come to an economically optimal solution. The mathematical methods presented in the scientific literature are aimed at solving problems of determining the optimal location of logistics infrastructure objects, namely a manufacturing plant, a warehouse, a distribution centre, a retail outlet. The paper formulates and implements an algorithm for constructing an optimal network of polygons, which would minimize economic costs for logistics, construction, and operation of the polygons. The main factors taken into account are the mass of generated solid communal waste, the transportation cost from the temporary accumulation site to the solid communal waste polygon, the distance between administrative centres. The basic principle of searching for the logistics extremum is based on determining the main node, that is the one with the largest mass of solid communal waste along all available road junctions and choosing the polygon location based on the condition of the maximum difference in annual logistics costs. Using the proposed algorithm, the paper solves the problem of determining the number and location of solid communal waste polygons for the southern part of the Komi Republic.

Keywords: solid communal waste polygons, capacity of the polygon, logistics, economic efficiency, optimal solution, route graph, chain, node

For citation: Lyutoev A.A., Khabaeva E.V. Algorithm for Searching for an Optimal Network of Polygons for Collecting Solid Communal Waste. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 25-34. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-25-34.

Введение

Рост численности населения городов и развитие промышленности в регионах непосредственно влекут за собой увеличение количества образующихся бытовых и промышленных отходов. Неправильный сбор, несвоевременное удаление и неудовлетворительное обезвреживание бытовых и промышленных отходов оказывают негативное воздействие на экологическую обстановку в регионе – наносят экологический ущерб окружающей среде, вызывая загрязнение атмосферного воздуха, почвы, поверхностных и подземных вод.

Одним из национальных проектов, реализуемых в настоящее время на территории РФ, является проект «Экология» (2019 – 2024 гг.), который нацелен на «Создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, обеспечивающей сортировку отходов в объеме ста процентов...» [1]. Реализация данного проекта предполагает организацию в каждом регионе РФ полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления, что является важным элементом жизнеобеспечения населения данного региона. Количество и площадь полигонов зависит от численности жителей населённых пунктов, обслуживаемых полигонами, их площади и конфигурации, дальности транспортировки отходов.

В научной литературе описываются различные математические методы и модели, позволяющие определить оптимальное расположение различных объектов инфраструктуры. Среди них можно выделить простые методы (эвристический метод Ардалана, метод центра тяжести, метод пробной точки, метод сетки и т.д.) дающие экспресс оценку, поскольку в их основе лежит большое количество допущений и сложные методы и модели (метод калькуляции затрат, метод начисления баллов, метод аналитической иерархии, методы сетевого моделирования, метод непрерывной и дискретной оптимизации), позволяющие определить более точное решение поставленной задачи [2 – 7].

Рассмотренные подходы в большинстве своем применимы для решения задач определения оптимального места расположения объекта логистической инфраструктуры – производственного предприятия, склада, распределительного центра, торговой точки [10 – 16].

Материалы и методы

Места расположения полигонов определяются на основе анализа ряда факторов: экологических, экономических, социальных [8, 9]. Экономические факторы размещения полигона предполагают затраты на разработку проекта, строительство, функционирование объекта и перевозку отходов. Таким образом, экономические затраты на организацию полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления включают в себя затраты на строительство полигонов, их эксплуатацию и логистику ТКО. Для временного периода k лет функция затрат может быть представлена в виде $Z = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + k \sum_{i=1}^n E_i(Q) + k \cdot P_n$,

где $S_i(Q)$ – сметная стоимость строительства i -ого полигона мощностью Q (т/год); $E_i(Q)$ – удельная стоимость эксплуатации i -ого полигона мощностью Q за один год; P_n – затраты на логистику ТКО для n полигонов за один год.

Авторами предлагается методологический подход, позволяющий спроектировать оптимальную сеть мусорных полигонов с учетом таких ключевых факторов, как образуемая в каждом МО масса ТКО и имеющаяся транспортная сеть. Подход предполагает реализацию трех этапов (рис. 1): выбор мест расположения полигонов; расчет стоимости строительства полигонов; построение и расчет оптимального значения целевой функции.

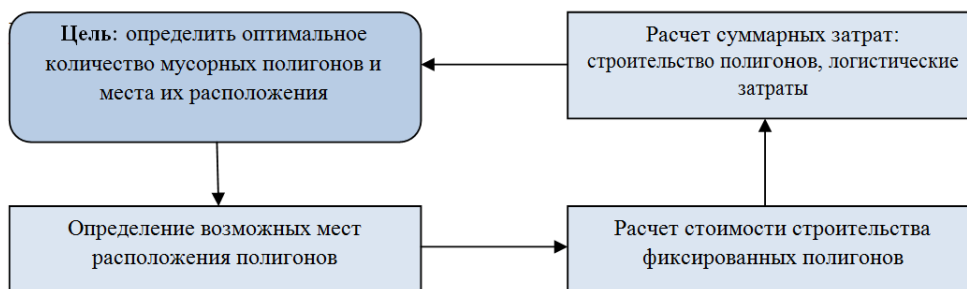


Рис. 1. Этапы поиска оптимума
Fig. 1. Stages of searching for the optimum

На первом этапе на основе расчета логистических затрат определяются МО, на территории которых целесообразно размещение полигона ТКО. Выбор места расположения очередного $(j+1)$ -го полигона предлагается осуществлять посредством реализации алгоритма:

1. Разбиение маршрутного графа на цепи (от фиксированных полигонов до листов).
2. Определение в каждой цепи главного узла – узел с наибольшей массой ТКО (потенциальный $(j+1)$ -ый полигон Π_{j+1}).
3. Для каждого главного узла
 - 1) создание группы из n узлов N_i из условия, что расстояние от i -ого узла до главного узла $d \rightarrow \min$;
 - 2) прикрепление не присоединённых к этой группе узлов к одному из фиксированных полигонов $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j$, исходя из условия, что расстояние от i -ого узла до полигона $d \rightarrow \min$;
 - 3) расчет годовых логистических затрат для сети полигонов $\{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j, \Pi_{j+1}\}$ P_{j+1} на основе данных из табл. 2, 3;
 - 4) расчет экономической эффективности $P_j - P_{j+1}$.
4. Выбор среди главных узлов $j+1$ -ого полигона из условия $P_j - P_{j+1} \rightarrow \max$.
5. Проведение итерации по ребрам, исходящим из $j+1$ -го полигона, с целью уточнения местоположения полигона на основе расчета затрат.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу поиска количества и мест расположения полигонов для сбора, обработки и утилизации ТКО в Республике Коми N .

Регион N территориально включает в себя четырнадцать муниципальных образований с административными центрами N_i (рис. 2).

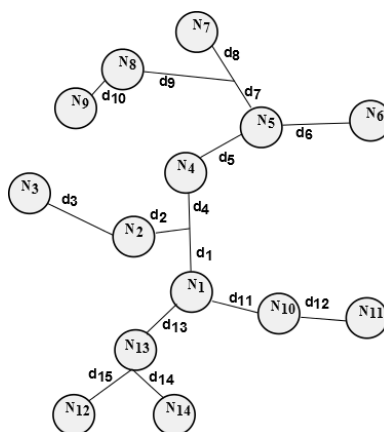


Рис. 2. Схема дорожной развязки регион N (маршрутный граф)
Fig. 2. Road junction diagram region N (route graph)

Данные, по каждому МО региона, необходимые для расчётов представлены в таблицах (табл. 1 – 3).

Таблица 1

Масса ТКО по МО

Table 1

Mass of SMW according to MO

MON _i	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁	N ₁₂	N ₁₃	N ₁₄
Масса ТКО Q _i , т/год	99044	7270	5144	5880	55220	3109	4128	2814	2309	1641	4639	4129	2982	4184

Стоимость перевозки от площадки временного накопления до полигона 1 м³ ТКО составляет 1,42 руб/км. Исходя из усредненной величины плотности отходов ТКО 250 кг/м³ (0,25 т/м³), стоимость перевозки одной тонны ТКО составит $m = 1,42 \cdot 4 = 5,68$ руб/км. На основе данных из табл. 1 произведен расчет затрат на перевозку ТКО по формуле $p_i = Q_i \cdot m$ (см. табл. 2).

Таблица 2

Затраты на перевозку ТКО на 1 километр в год по МО (руб/км)

Table 2

Costs for transporting SMW per 1 kilometer per year according to MO

МО N _i	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁	N ₁₂	N ₁₃	N ₁₄
затраты P _i , руб.	562569,92	41293,60	29217,92	33398,40	313649,60	17659,12	23447,04	15983,52	13115,12	9320,88	26349,52	23452,72	16937,76	23765,12

Таблица 3

Расстояния от административных центров МО до перекрестков (км)

Table 3

Distances from the administrative centers of MO to intersections (km)

d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉	d ₁₀	d ₁₁	d ₁₂	d ₁₃	d ₁₄	d ₁₅
67	27	189	61	190	180	32	178	207	127	47	139	81	104	100

Необходимо найти экономически оптимальное решение поставленной задачи, т.е. определить такое количество и местоположение полигонов, которое обеспечило бы минимальные экономические затраты на логистику, строительство и эксплуатацию полигонов.

Результаты

На первом шаге фиксируется место положения одного полигона P_1 в МО с наибольшей годовой массой ТКО, т.е. в окрестности административного центра N₁. На основе данных из табл. 2, 3 рассчитаны годовые логистические затраты для полигона P_1 $P_1 = 168572914,4$ руб.

Посредством реализации вышеописанного алгоритма определяется место расположения второго полигона P_2 .

Таблица 4

Расчетные данные для определения места расположения второго полигона

Table 4

Calculation data for determining the location of the second polygon

Главный узел, МО	Общие логистические затраты P ₂ , руб.	Экономическая эффективность P ₁ – P ₂ , руб.
N ₂	145 254 720	23 318 195
N ₅	46 507 215	122 065 699
N ₁₁	163 671 904	4 901 011
N ₁₂	164 327 972	4 244 942
N ₁₃	164 546 294	4 026 620

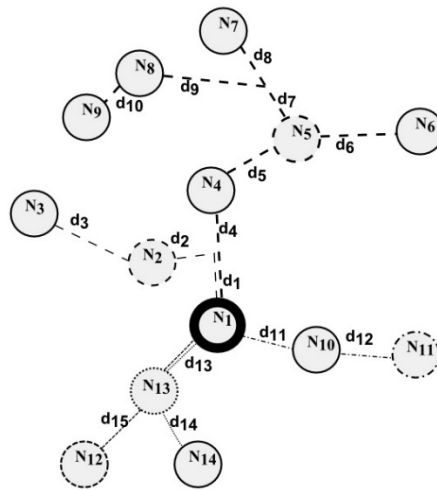


Рис. 3. Разбиение на цепи маршрутного графа, выбор главных узлов
 Fig. 3. Partitioning the route graph into chains, selecting main nodes

На основании расчетов фиксируется место расположения второго полигона P_2 в окрестности административного центра N_5 . Проводятся итерации по ребрам, исходящим из административных центров N_1 (d_1, d_{11}, d_{13}) и N_5 (d_5, d_6, d_7) с целью расчета затрат и уточнения места расположения полигонов P_1 и P_2 . На основании проведенных расчетов определяются места положения полигонов (рис. 4).

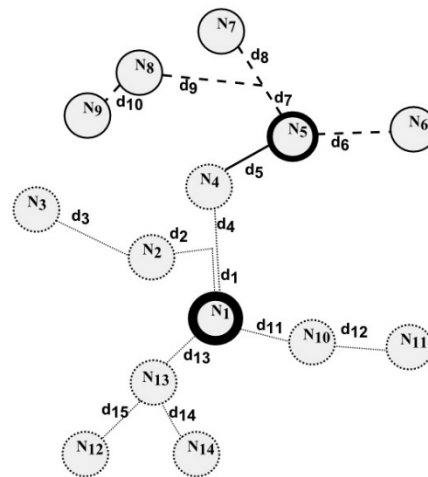


Рис. 4. Маршрутный граф, фиксированные полигоны P_1, P_2
 Fig. 4. Route graph, fixed polygons P_1, P_2

Привязка МО к фиксированным полигонам P_1, P_2

Таблица 5

Table 5

<i>Binding MO to fixed polygons P_1, P_2</i>	
P_1 MO N_1	$N_1, N_2, N_3, N_4, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{14}$ Мощность 134 913 т/год
P_2 MO N_5	N_5, N_6, N_7, N_8, N_9 Мощность 67 580 т/год

Наименьшие логистические затраты для двух полигонов P_1 и P_2 составят $P_2 = 46\,507\,215$ руб.

Посредством реализации алгоритма определяется место расположения третьего полигона P_3 . Для этого на каждой цепи выделены главные узлы (рис. 5).

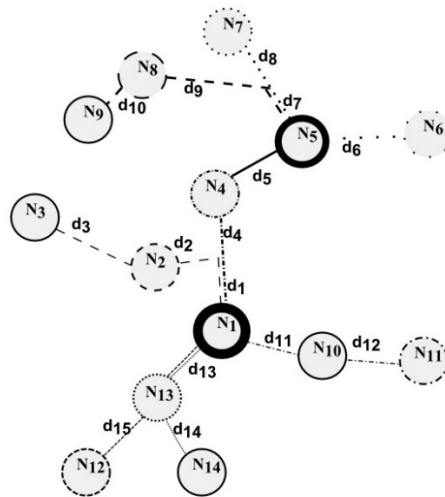


Рис. 5. Разбиение на цепи маршрутного графа, выбор главных узлов
 Fig. 5. Partitioning the route graph into chains, selecting main nodes

Расчетные данные для определения места расположения третьего полигона

Таблица 6

Table 6

Calculation data for determining the location of the third polygon

Главный узел, МО	Общие логистические затраты P_3 , руб.	Экономическая эффективность $P_2 - P_3$, руб.
N_2	38 543 196	7 964 019
N_4	41 809 151	4 698 064
N_6	43 328 574	3 178 642
N_7	41 583 337	4 923 878
N_8	39 552 640	6 954 575
N_{11}	41 606 204	4 901 011
N_{12}	42 262 273	4 244 942
N_{13}	42 480 595	4 026 620

На основании расчетов фиксируется место расположения третьего полигона Π_3 в окрестности административного центра N_2 . Проводятся итерации по ребрам, исходящим из административных центров N_1 (d_1, d_{11}, d_{13}), N_5 (d_5, d_6, d_7) и N_2 (d_2, d_3) с целью расчета затрат и уточнения места расположения полигонов Π_1, Π_2 и Π_3 . На основании проведенных расчетов определяются места положения полигонов (рис. 6).

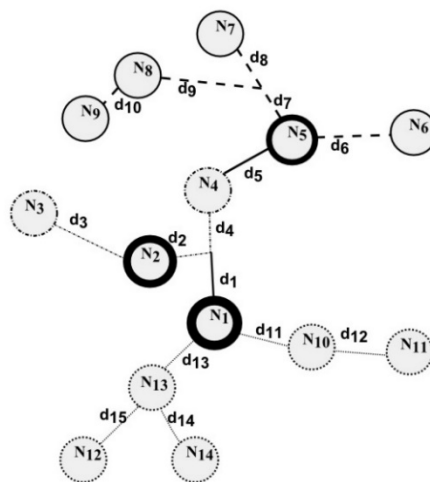


Рис. 6. Маршрутный граф, фиксированные полигоны Π_1, Π_2, Π_3
 Fig. 6. Route graph, fixed polygons Π_1, Π_2, Π_3

Привязка МО к фиксированным полигонам Π_1, Π_2, Π_3

Table 7

<i>Linking MO to fixed polygons Π_1, Π_2, Π_3</i>	
Π_1 MO N_1	$N_1, N_{10}, N_{11}, N_{12}, N_{13}, N_{14}$ Мощность 116 619 т/год
Π_2 MO N_5	N_5, N_6, N_7, N_8, N_9 Мощность 67 580 т/год
Π_3 MO N_2	N_2, N_3, N_4 Мощность 18 294 т/год

Наименьшие логистические затраты для трех полигонов Π_1, Π_2 и Π_3 составят $P_3 = 38\,543\,196$ руб.

Посредством последовательной реализации алгоритма, определяется место положения полигонов Π_4, Π_5, Π_6 и Π_7 .

На втором этапе решения задачи проведен анализ имеющихся данных о проектной стоимости строительства и мощности ряда полигонов в регионе N и построена линейная функциональная зависимость стоимости строительства полигона от мощности (рис. 7).



Рис. 7. Линия тренда стоимости строительства полигона от мощности
Fig. 7. Trend line of landfill construction cost versus capacity

Найденная функциональная зависимость позволяет рассчитать приближенную стоимость строительства полигона мощностью $Q_i S_i(Q) = 26020 \cdot Q_i + 334100000$ (табл. 8).

Третий этап решения задачи предполагает построение и расчет оптимального значения целевой функции. Анализируя функцию затрат $Z = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + k \sum_{i=1}^n E_i(Q) + k \cdot P_n$ можно заметить, что сумма удельных стоимостей эксплуатации n полигонов $\sum_{i=1}^n E_i(Q)$, включающая в себя затраты на обработку ТКО внутри полигонов (складирование, прессовка и т.д.), представляет собой величину постоянную для данного региона, определяемую объемом ТКО и не зависящую ни от количества, ни от мест расположения полигонов. Следовательно, эта составляющая не будет оказывать влияние на выбор оптимального решения. Таким образом, в

качестве целевой функции предлагается рассматривать функцию $Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + 20P_n$, описывающую суммарные затраты на строительство полигонов и логистику ТКО на период 20 лет. Данные, полученные на первых двух этапах, позволяют рассчитать значение целевой функции для различного числа полигонов (табл. 9, рис. 8).

Таблица 8

Расчет стоимости строительства полигонов

Table 8

Calculation of the cost of construction of landfills

Один полигон	Π_1						
Мощность, т/год	202 493						
Стоимость, руб.	5 568 867 860						
Два полигона	Π_1	Π_2					
Мощность, т/год	134 913	67 580					
Стоимость, руб.	3 810 436 260	2 058 431 600					
Три полигона	Π_1	Π_2	Π_3				
Мощность, т/год	116 619	67 580	18 294				
Стоимость, руб.	3 334 426 380	2 058 431 600	776 009 880				
Четыре полигона	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4			
Мощность, т/год	116 619	62 457	18 294	5 123			
Стоимость, руб.	3 334 426 380	1 925 131 140	776 009 880	433 300 460			
Пять полигонов	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5		
Мощность, т/год	116 619	62 457	13 150	5 123	5 144		
Стоимость, руб.	3 334 426 380	1 925 131 140	642 163 000	433 300 460	433 846 880		
Шесть полигонов	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	
Мощность, т/год	116 619	58 329	13 150	5 123	5 144	4 128	
Стоимость, руб.	3 334 426 380	1 817 720 580	642 163 000	433 300 460	433 846 880	407 410 560	
Семь полигонов	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7
Мощность, т/год	111 980	58 329	13 150	5 123	5 144	4 128	4 639
Стоимость, руб.	3 213 719 600	1 817 720 580	642 163 000	433 300 460	433 846 880	407 410 560	420 706 780

Таблица 9

Расчет значений целевой функции $Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + 20P_n$

Table 9

Calculation of objective function values $Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i(Q) + 20P_n$

Количество полигонов	Стоимость строительства полигонов, руб.	Затраты на логистику в год, руб.	Затраты на логистику, 20 лет, руб.	Суммарные затраты, руб.
1	5 568 867 860	168 572 914,00	3 371 458 280,00	8 940 326 140,00
2	5 868 867 860	46 507 215,00	930 144 300,00	6 799 012 160,00
3	6 168 867 860	38 543 196,00	770 863 920,00	6 939 731 780,00
4	6 468 867 860	31 588 621,00	631 772 420,00	7 100 640 280,00
5	6 768 867 860	26 066 434,00	521 328 680,00	7 290 196 540,00
6	7 068 867 860	21 142 556,00	422 851 120,00	7 491 718 980,00
7	7 368 867 860	16 241 545,00	324 830 900,00	7 693 698 760,00

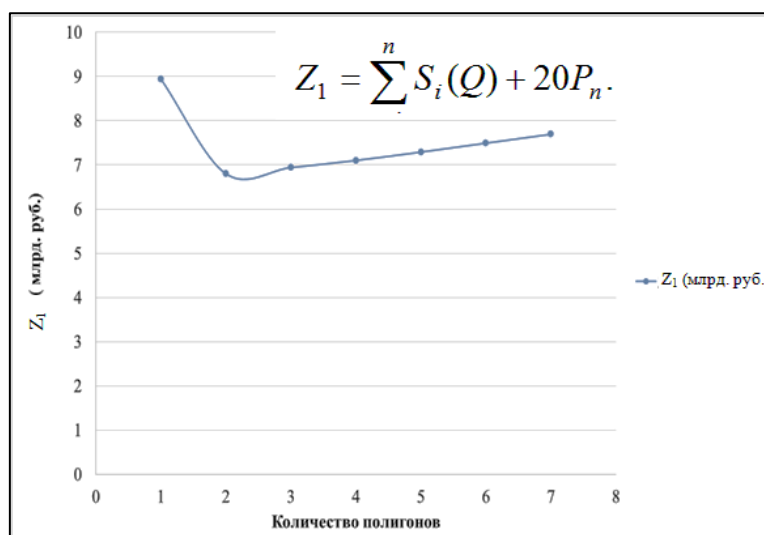


Рис. 8. Зависимость суммарных затрат от количества полигонов (срок эксплуатации 20 лет)
 Fig. 7. Dependence of total costs on the number of landfills (operation life 20 years)

Минимальные суммарные затраты составят $Z_1 = 6\,799\,012\,160$ руб., в том числе затраты на строительство полигонов $S_1(134\,913) + S_2(67\,580) = 5\,868\,867\,860$ руб. и затраты на логистику $ТКО\ 20 \cdot P_2 = 20 \cdot 46\,507\,215 = 930\,144\,300$ руб.

Заключение

В заключение следует отметить, что разработанный алгоритм позволяет избежать многократных итераций при поиске оптимального значения в обратном направлении, в виду высокой проектной стоимости строительства полигона. Проведенные расчеты дали возможность сформулировать оптимальное решение – строительство полигонов для хранения, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления в двух муниципальных округах МО Республики Коми, что обеспечит минимальные экономические затраты на строительство, эксплуатацию полигонов и логистику ТКО.

Список источников:

1. Национальный проект «Экология»: [Электронный ресурс]. URL: <https://ecologyofrussia.ru/proekt>. (Дата обращения: 16.01.2024).
2. Соколов А.В., Юков В.В. Методы оптимальных решений. В 2 томах. Том 1. Общие положения. Математическое программирование и моделирование. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 564 с.
3. Машунин Ю.К. Теория и методы принятия оптимальных решений по множеству критериев в инженерных системах : монография. – М.: РУСАЙНС, 2023. – 340 с.
4. Нефедов Д.Г. Математические модели и методы решения задач оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нефедов Денис Геннадьевич; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. – Челябинск. – 2015. – 120 с.
5. Чернышев С.В. Модели, методы и алгоритмы эффективного решения задачи маршрутизации транспорта на графах больших размерностей : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Чернышев Сергей Владленович; Нац. исслед. ун-т "Высш. шк. экономики". – М.: 2011. – 116 с.

References:

1. National Project "Ecology" [Internet] [cited 2024 Jan 16]. Available from: <https://ecologyofrussia.ru/proekt>
2. Sokolov A.V., Yukov V.V. Methods of the Best Solutions. Volume 1. General Provisions. Mathematical Programming and Modeling. Moscow: Fizmatlit; 2014.
3. Mashunin Yu.K. Theory and Methods of Making Optimal Decisions Based on Multiple Criteria in Engineering Systems. Moscow: Ruscience; 2023.
4. Nefedov D.G. Mathematical Models and Methods for Solving Problems of Optimal Placement of Elements of a Distributed Production Structure. Candidate's Thesis in Technical Sciences. Chelyabinsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University; 2015.
5. Chernyshev S.V. Models, Methods, and Algorithms for Effectively Solving the Problem of Transport Routing on Large-Dimensional Graphs. Candidate's Thesis in Physics and Mathematics. Moscow: Higher School of Economics; 2011.

6. Просветов Г.И. Математические методы в логистике. Задачи и решения. – М.: «Альфа-Пресс». – 2008. – 304 с.

7. Зайнуллина, Э. Ш. Модели и методы решения задачи оптимальной маршрутизации данных в корпоративных сетях : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Зайнуллина Эльмира Шаукатовна; Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева.- Казань, 2008.- 119 с.

8. СП 320.1325800.2017 ПОЛИГОНЫ ДЛЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ. Проектирование, эксплуатация и рекультивация

9. СП 2.1.7.1038-01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для ТБО

10. Кириллов А.В., Цепин В.Е. Модель построения сети дистрибуции на основе многофакторного анализа промышленно-логистического потенциала регионов // Экономика региона. – 2015. – №4. – С. 336-345.

11. Попов П.В., Мирецкий И.Ю. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона // Экономика региона. – 2019. – Т. 15. – №2. – С. 483-492.

12. Гаджинский А.М. Выбор места расположения склада // Справочник экономиста. – 2004. – №8.

13. Бухаров Д.С. Определение оптимального количества и расположения логистических центров. Математическая модель и численный метод // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №4 (63). – С. 8-14.

14. Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А. Поиск путей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения: обзор методического инструментария // Проблемы развития территории. – 2021. – Т. 25. – № 2. – С. 108-127.

15. Москвичев О.В., Леонова С.А. Методика выбора мест размещения транспортно-пересадочных узлов на основе оптимизационной математической модели // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 198-213.

16. Дулесов А.С., Прутовых М.А. Методика решения задачи об оптимальном размещении производственных объектов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 151-158.

Информация об авторах:

Лютоев Александр Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры Физики и высшей математики Ухтинского государственного технического университета

Хабеева Елена Владимировна

старший преподаватель кафедры Физики и высшей математики Ухтинского государственного технического университета

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 28.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 28.02.2024.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

6. Prosvetov G.I. Mathematical Methods in Logistics. Problems and Solutions. Moscow: Alfa-Press; 2008.

7. Zainullina E.Sh. Models and Methods for Solving the Problem of Optimal Data Routing in Corporate Networks. Candidate's Thesis in Physics and Mathematics. Kazan: National Research Technical University Named After A.N. Tupolev; 2008.

8. Code 320.1325800.2017. Polygons for Solid Communal Waste. Projecting, Operation and Reclamation.

9. Code 2.1.7.1038-01 Hygienic Requirements for the Arrangement and Maintenance of Solid Domestic Waste Disposal Sites.

10. Kirillov A.V., Tsepin V.E. Model for Building a Distribution Network Based on the Multivariate Analysis of the Industrial and Logistical Potential of Regions. Economy of Regions. 2015;4:336-345.

11. Popov P.V., Miretsky I.Yu. Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure. Economy of Regions. 2019;15(2):483-492.

12. Gadzhinsky A.M. Choosing a Warehouse Location. Economist's Handbook. 2004;8.

13. Bukharov D.S. Determination of Optimal Number and Location of Logistics Centres: Mathematical Model And Numerical Method. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2012;4(63):8-14.

14. Dianov S.V., Kalashnikov K.N., Rigin V.A. Search for Ways of Optimal Spatial Placement of Healthcare Infrastructure Facilities: a Review of Methodological Tools. Problems of Territory's Development. 2021;25(2):108-127.

15. Moskvichev O.V., Leonova S.A. Methodology of Selection of Transport Interchange Hubs Location Based on Optimization Mathematical Model. World of Transport and Transportation. 2020;18(2):198-213.

16. Dulesov A.S., Prutovykh M.A. The Method of Task's Solution About Optimum Siting of Production Objects. Modern Problems of Science and Education. 2013;5:151-158.

Information about the authors:

Lyutoev Alexander Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Physics and Higher Mathematics" of Ukhta State Technical University

Khabaeva Elena Vladimirovna

Senior Lecturer of the Department "Physics and Higher Mathematics" of Ukhta State Technical University

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.51

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-35-44

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСХОДА ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Александр Георгиевич Подвесовский^{1✉}, Дмитрий Григорьевич Лагерев²,
Александр Андреевич Филонов³

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

¹ apodv@tu-bryansk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1118-3266>

² lagerevdg@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2702-6492>

³ afilonovcontact@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4749-4290>

Аннотация. Оценка и прогнозирование динамических показателей полета беспилотного летательного аппарата, связана со сложностью построения и применения строгих математических моделей, учитывающих множество разнородных параметров. Рассмотрена задача оценки расхода заряда аккумулятора беспилотного летательного аппарата при полете по заданному маршруту с учетом погодных условий и геопространственных характеристик. Предложен подход к ее решению, основанный на уточнении оценки, полученной с помощью приближенной зависимости, путем нахождения интервала, с наибольшей вероятностью содержащий фактическое значение расхода. Для нахождения указанного интервала предложено использовать метод бинарной классификации с применением моделей логистической регрессии на основе обучающего набора данных. Построен конвейер, объединяющий механизмы построения, обучения и применения модели оценки. Описана реализация данного конвейера средствами аналитической платформы Loginom, входящей в Российский реестр программного обеспечения. Рассмотрены особенности подготовки обучающих данных, а также результаты обучения модели и ее проверки на тестовом наборе данных.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, расход заряда аккумулятора, интеллектуальный анализ данных, логистическая регрессия, биннинг

Для цитирования: Подвесовский А.Г., Лагерев Д.Г., Филонов А.А. Применение интеллектуального анализа данных для оценки расхода заряда аккумулятора беспилотного летательного аппарата // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 35-44. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-35-44.

Original article

Open Access Article

USING DATA MINING TO ESTIMATE UNMANNED AERIAL VEHICLE BATTERY CONSUMPTION

Alexander G. Podvesovskiy^{1✉}, Dmitry G. Lagerev²,
Alexander A. Filonov³

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ apodv@tu-bryansk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1118-3266>

² lagerevdg@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2702-6492>

³ afilonovcontact@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-4749-4290>

Abstract. Assessing and predicting the dynamic flight performance of an unmanned aerial vehicle is associated with the complexity of constructing and applying strict mathematical models that take into account many heterogeneous parameters. The paper examines the problem of estimating the battery consumption of an unmanned aerial vehicle when flying along a given route, considering weather conditions and geospatial characteristics. An approach to its solution is proposed, based on clarifying the estimate obtained using an approximate dependence by finding the interval with the highest probability containing the actual flow value. To find the specified interval, it is proposed to use the binary classification method applying logistic regression models based on the training data set. A pipeline is built that combines the mechanisms of constructing, training, and applying the assessment model. Implementing this pipeline using the Loginom analytical platform, which is included in the Russian software register, is described. The features of preparing training data, as well as the results of teaching the model and checking it on the test data set are considered.

Keywords: unmanned aerial vehicle, battery consumption, data mining, logistic regression, binning

For citation: Podvesovskiy A.G., Lagerev D.G., Filonov A.A. Using Data Mining to Estimate Unmanned Aerial Vehicle Battery Consumption. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 35-44. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-35-44.

Введение

Оценка и прогнозирование расхода энергии (заряда) аккумуляторной батареи при перемещении беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в воздухе по заданному маршруту относится к классу задач расчета динамических характеристик БПЛА, наряду с такими задачами, как расчет необходимой емкости аккумуляторной батареи по времени полета, оценка продолжительности полета БПЛА по емкости батареи [1, 2], расчет времени полета по заданному маршруту [2, 3] и др. Разработка математического и программного обеспечения для моделирования подобных задач представляет собой направление, актуальное для целого ряда приложений – от планирования маршрутов и оптимизации загрузки БПЛА при решении задач транспортировки грузов [4, 5] до выбора оптимального сценария динамической реконфигурации роя [6] или гетерогенной группы БПЛА [7] при выходе из строя отдельных аппаратов или потере связи с ними. Во всех указанных случаях расход заряда аккумуляторной батареи выступает в качестве одного из целевых показателей при решении соответствующих оптимизационных задач.

Основная проблема, возникающая при оценке динамических характеристик БПЛА, состоит в сложности построения строгих математических моделей, позволяющих осуществлять подобную оценку. Так расход заряда зависит не только от параметров маршрута и летно-технических характеристик БПЛА, но и от множества других разнородных параметров, характеризующих погодные условия (температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра и т.д.), особенности рельефа местности вдоль маршрута и др. [8, 9]. Кроме того, на расход заряда оказывают влияние различные динамические возмущения, связанные с конкретными условиями полета, а также трудно предсказуемые. В этой связи применение известных из литературы аналитических зависимостей и формул для оценки расхода заряда аккумулятора при перемещении БПЛА хоть и позволяет получить некоторое прогнозное значение этой величины, но отклонение полученного значения от реального, которое будет иметь место в конкретных условиях полета, может оказаться весьма значительным.

В качестве примера можно привести формулу, которая предлагается в работе [7], со ссылкой на работу [10], для оценки расхода заряда при перемещении БПЛА по кратчайшему прямолинейному маршруту между заданными начальной и конечной точками:

$$C = \frac{q}{v} \left(k_1 v^3 + \frac{k_2}{v} \right), \quad (1)$$

где C – величина расхода заряда; q – расстояние между начальной и конечной точками; v – скорость перемещения БПЛА; k_1, k_2 – поправочные коэффициенты, зависящие от массы БПЛА и силы ветра. Первое слагаемое в скобках определяет расход энергии, вызванный трением воздуха во время полета, который пропорционален кубу скорости, второе слагаемое – расход энергии, необходимый для преодоления подъемной силы. При этом отмечается, что данная формула носит эвристический характер, в ее основу положен ряд упрощающих предположений (например, о постоянной скорости полета), и в ней не учитывается влияние многих параметров, перечисленных выше.

При наличии достаточного объема исторических данных о фактических значениях величины расхода заряда аккумулятора при перемещении БПЛА определенного типа в различных условиях (физико-географических, погодных и др.) для построения модели оценки расхода заряда можно воспользоваться подходом, основанным на интеллектуальном анализе данных (ИАД). В этом случае набор имеющихся данных выступает в роли обучающего множества, и модель может строиться на его основе, в виде, например, нейронной сети. Данный подход в общем случае позволяет учесть большее количество показателей, влияющих на величину расхода заряда, чем использование аналитических зависимостей, а кроме того, получаемые модели в большей степени адаптированы к разнородности, неточности и неполноте данных.

Вместе с тем, получение набора данных для полноценного обучения модели не всегда возможно и часто связано со значительными временными и другими затратами. В этом случае

можно применять комбинированный подход, в рамках которого с помощью аналитической зависимости, подобной (1), вычисляется приближенное значение величины расхода, а затем, с использованием доступного обучающего множества, выбирается доверительный интервал, который с наибольшей вероятностью будет включать фактическое значение данного показателя. При определенном снижении точности оценивания, по сравнению с применением машинного обучения «в чистом виде», данный подход позволяет получить модель, обладающую большей интерпретируемостью, и результаты ее построения можно использовать для выделения дополнительных факторов, оказывающих влияние на величину расхода заряда.

В настоящей работе предлагается способ построения и настройки параметров модели оценки расхода заряда на основе комбинированного подхода, использующего формулу (1), для которой доверительные интервалы определяются с помощью бинарной классификации на основе моделей логистической регрессии.

Структура и формальное представление модели оценки расхода заряда

Общий набор обучающих данных модели включает в себя несколько наборов данных и формально представляется в виде:

$$X = \langle R, W, G, S \rangle,$$

где R – данные о полетных заданиях; W – данные о погодных условиях; G – геопространственные данные; S – данные о летно-технических характеристиках БПЛА.

Набор данных R содержит данные о маршрутах полетов в виде набора опорных точек (включая начальную и конечную точки), имеющих геоконтекстную привязку. Кроме того, в этот набор входят временные метки, связанные с прохождением опорных точек маршрута, сведения об используемой на маршруте модели БПЛА, а также о динамических параметрах БПЛА, изменяющихся в процессе выполнения полетного задания, включая массу БПЛА и заряд аккумулятора с привязкой к опорным точкам.

Набор W описывает погодные условия, которые могут оказывать влияние на ход выполнения полетного задания. К ним могут относиться температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра и т.д. [8, 9]. Эти данные также имеют геоконтекстную привязку и привязку ко времени, что позволяет устанавливать связь между полетными заданиями и конкретными погодными условиями, имевшими место при его выполнении.

К геопространственным данным, входящим в набор G , относятся данные о рельефе местности вдоль маршрута следования БПЛА в рамках полетного задания, карты высот и другие факторы, которые могут оказывать влияние на сложность прохождения летательным аппаратом конкретных участков маршрута.

Отметим, что в случае неполноты или отсутствия данных из наборов W или G для отдельных участков маршрута, неизвестные значения могут заменяться на усредненные или задаваться экспертным путем.

Набор данных S включает в себя статические сведения о летно-технических характеристиках различных моделей БПЛА: максимальная и крейсерская скорость, дальность полета, диапазон использования высот, взлетно-посадочные характеристики и др.

Входными данными модели оценки являются данные о конкретном полетном задании, для которого необходимо оценить величину расхода заряда аккумулятора. Такие данные будем называть рабочими и соответствующий набор данных будем обозначать R' .

Целью построения и применения модели, как уже неоднократно отмечалось, является оценка расхода заряда аккумулятора БПЛА при выполнении полетного задания, описываемого набором рабочих данных R' . В качестве приближенной оценки будем использовать величину C' , вычисленную по формуле (1) на основе набора рабочих данных R' . При этом будем предполагать, что значение q в формуле (1) может быть получено суммированием длин прямолинейных участков между всеми опорными точками маршрута. Для рассчитанного таким образом значения C' будем рассматривать интервал $D = (d_1, d_2)$ и через E обозначим искомую вероятность попадания в данный интервал фактического значения величины расхода заряда C , т.е.

$$E = P\{C \in D\}.$$

Заметим, что интервал D строится на основе оцененного значения C' , но в общем случае может как содержать, так и не содержать его (при значительной ошибке оценивания).

С учетом сказанного выше, набор выходных данных модели формально представляется в виде:

$$Y = \langle C', E \rangle,$$

и таким образом, модель оценки расхода заряда аккумулятора БПЛА на основе данных полетного задания допускает следующее формальное представление:

$$M = \langle X, R'; Y \rangle.$$

Для применения модели M необходимо предварительно выполнить шаги по ее созданию и настройке на основе обучающего набора данных X . Структурированное представление процесса построения, обучения и применения указанной модели будет далее называть конвейером оценки. Рассмотрим его более подробно.

Описание конвейера оценки

Предлагаемая структура конвейера оценки представлена на рис. 1 в виде диаграммы, построенной с применением нотации BPMN 2.0 [11]. Диаграмма описывает два процесса – создание модели M и ее последующее применение. Создание модели представляет собой итерационный процесс, который повторяется до тех пор, пока не будет достигнута приемлемая точность модели. Каждая итерация связана с корректировкой и оптимизацией параметров, используемых для обучения.

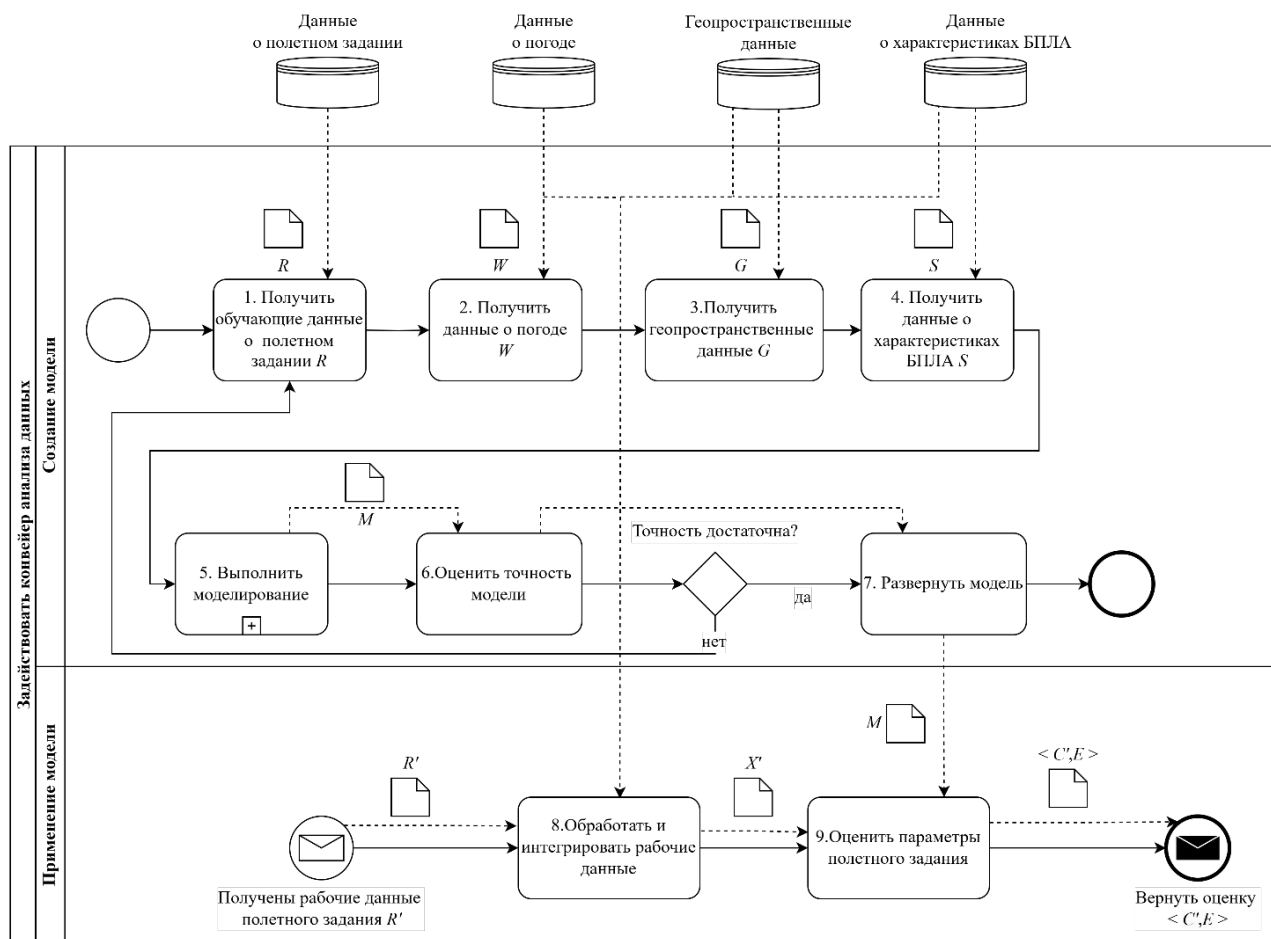


Рис. 1. Структура конвейера оценки
Fig. 1. Structure of estimation pipeline

Ключевым этапом построения модели на каждой итерации является процесс, показанный на рис. 1 в виде блока 5 (Выполнить моделирование). Детальная структура данного процесса, с учетом его реализации на основе применения подхода ИАД, представлена в виде BPMN-диаграммы на рис. 2.

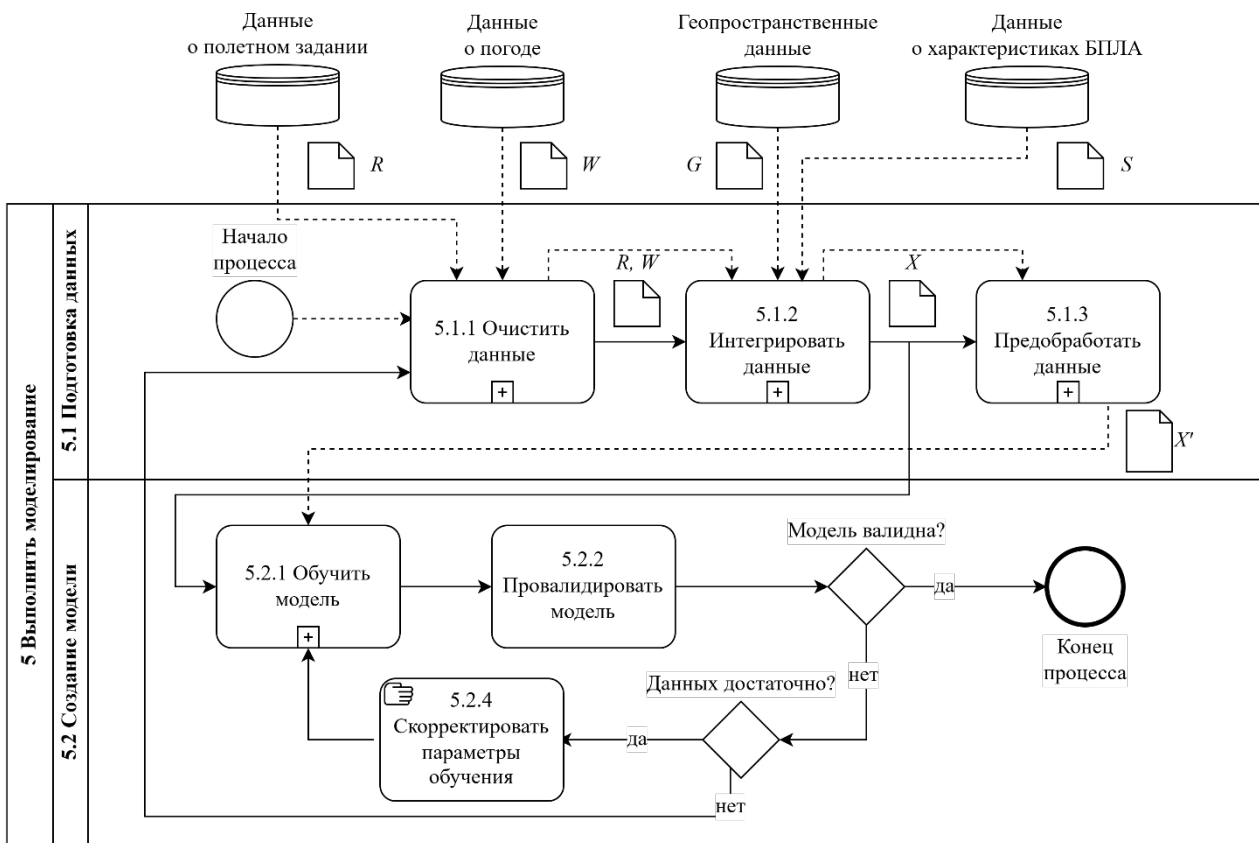


Рис. 2. Реализация модели оценки с применением подхода ИАД
Fig. 2. Implementation of the estimation model using the Intelligent Data Analysis approach

Как видно из рис. 2, процесс реализации модели также является итерационным. Под валидацией в блоке 5.2.2 подразумевается качественная проверка параметров обучения модели – соответствие типов данных, наличие нормализации и предобработки. При выявлении недочетов выполняется корректировка параметров модели или обучающих данных.

Отметим также, что обучающие данные о полетном задании R и погодных условиях W перед их объединением и использованием для обучения модели целесообразно предварительно обработать – выполнить нормализацию и вычислить интегральные показатели [12]. В частности, для некоторых погодных данных в этой ситуации целесообразным будет применение методов конечных классов или биннинга [13].

Процесс обучения модели M на рис. 2 показан в виде блока 5.2.1. Прежде чем перейти к его детальному рассмотрению, рассмотрим предлагаемый способ реализации самой модели. Для этого вернемся к исходной постановке задачи и формальной структуре модели M . Пусть для значения величины расхода заряда C' , рассчитанного на основе рабочих данных полетного задания R' с помощью формулы (1), задан некоторый набор интервалов D_1, D_2, \dots, D_N , и необходимо выбрать тот из них, в который с наибольшей вероятностью попадает фактическое значение расхода заряда C . Задача оценки вероятности попадания данной величины в конкретный интервал D_i ($i = 1, \dots, N$), по своей сути, является задачей бинарной классификации [12], поэтому для ее решения предлагается использовать логистическую регрессию.

Таким образом, механизм преобразования входных данных в выходные в рамках модели M реализуется в виде набора моделей логистической регрессии, каждая из которых связана с определенным интервалом D_i и вычисляет вероятность E_i попадания в данный интервал фактического значения величины расхода заряда. Обучение указанного набора моделей сводится к вычислению набора коэффициентов соответствующего набора функций логистической регрессии, для чего используется метод максимального правдоподобия.

На рис. 3 представлена BPMN-диаграмма, которая описывает структуру процесса обучения модели на примере ситуации, когда для оценки отклонения рассчитанного значения C' величины расхода заряда от фактического значения C используется 5 интервалов:

- 1) $D_1 = [C' - 0,05C'; C' + 0,05C']$ (отклонение не превышает 5 % в обе стороны);

- 2) $D_2 = (C' + 0,05C'; C' + 0,1C']$ (отклонение от 5 % до 10 % в сторону увеличения);
- 3) $D_3 = (C' - 0,01C'; C' - 0,05C']$ (отклонение от 5 % до 10 % в сторону уменьшения);
- 4) $D_4 = (C' + 0,1C'; ...)$ (отклонение более 10 % в сторону увеличения);
- 5) $D_5 = (...; C' - 0,1C')$ (отклонение более 10 % в сторону уменьшения).

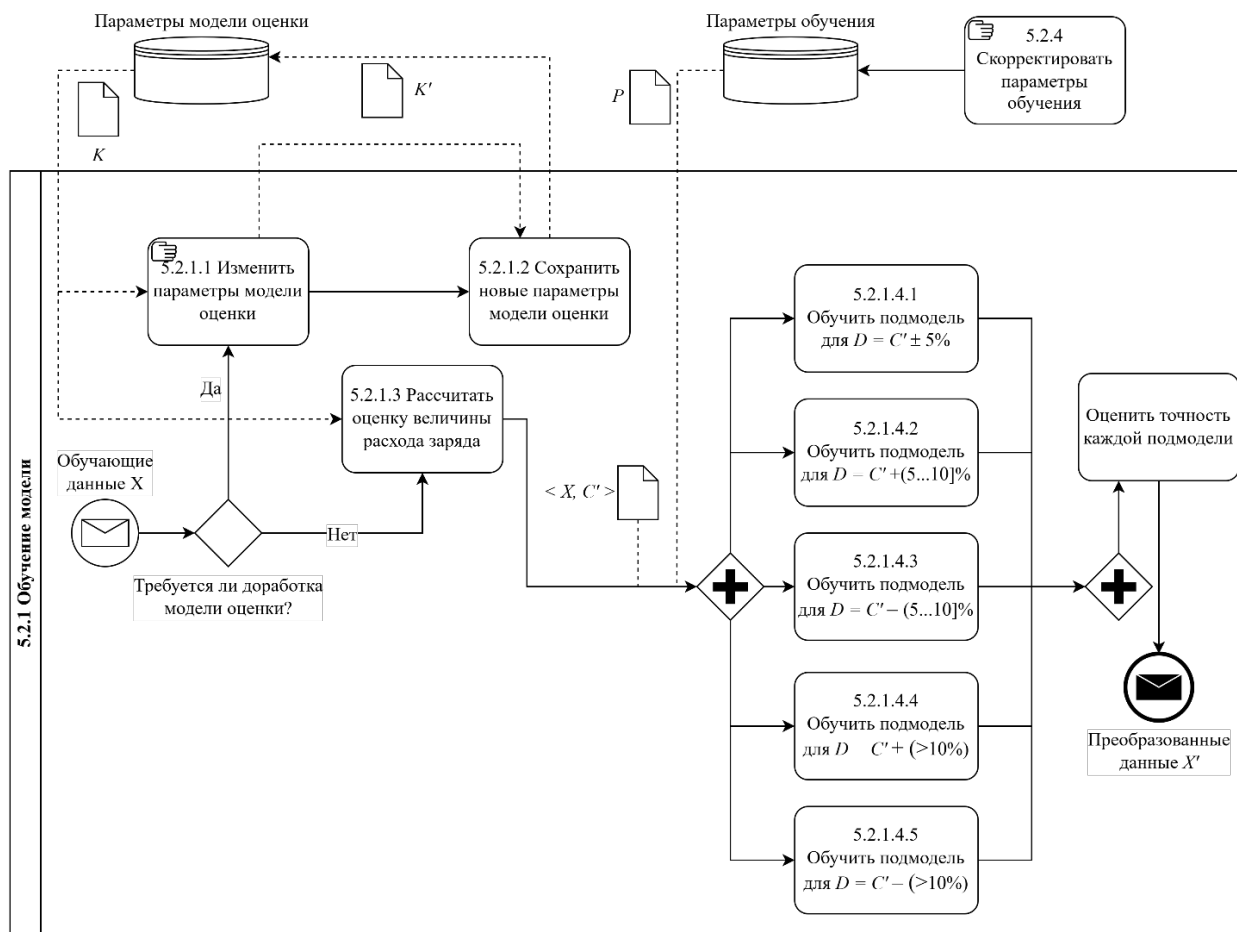


Рис. 3. Процесс обучения модели для некоторого заданного набора интервалов
Fig. 3. The training process for the model, applied to a specific set of intervals

В блоке 5.2.1.3 осуществляется расчет значения C' с использованием формулы (1), для которой все необходимые значения определяются на основе рабочих данных R' о полетном задании, с учетом погодных условий и характеристик БПЛА. Вычисленное значение C' добавляется к набору обучающих данных X , содержащему, среди прочего, информацию о фактических значениях C для различных ситуаций. Полученный набор используется для обучения пяти отдельных моделей логистической регрессии, представленных на рис. 3 блоками 5.2.1.4.1 – 5.2.1.4.5. Результатом обучения являются величины E_1, \dots, E_5 , определяющие вероятности попадания фактического значения расхода соответственно в интервалы D_1, \dots, D_5 . Далее выбирается интервал, характеризующийся наибольшим значением вероятности E_i .

Через K и K' на рис. 3 обозначены наборы коэффициентов логистической регрессии соответственно до и после обучения, через P – внутренние параметры метода максимального правдоподобия.

Отметим, что представленная на рис. 3 структура процесса обучения является масштабируемой и легко обобщается на любую структуру и число используемых интервалов D_i .

Программная реализация и экспериментальная проверка конвейера оценки

Программная реализация разработанного конвейера была выполнена с использованием аналитической платформы Loginom [14], входящей в Российский реестр программного обеспечения [15]. На рис. 4 показан пример реализации конвейера в среде Loginom, а также фрагменты наборов входных и выходных данных для модели логистической регрессии, соответствующей интервалу $D_1 = [C' - 0,05C'; C' + 0,05C']$.

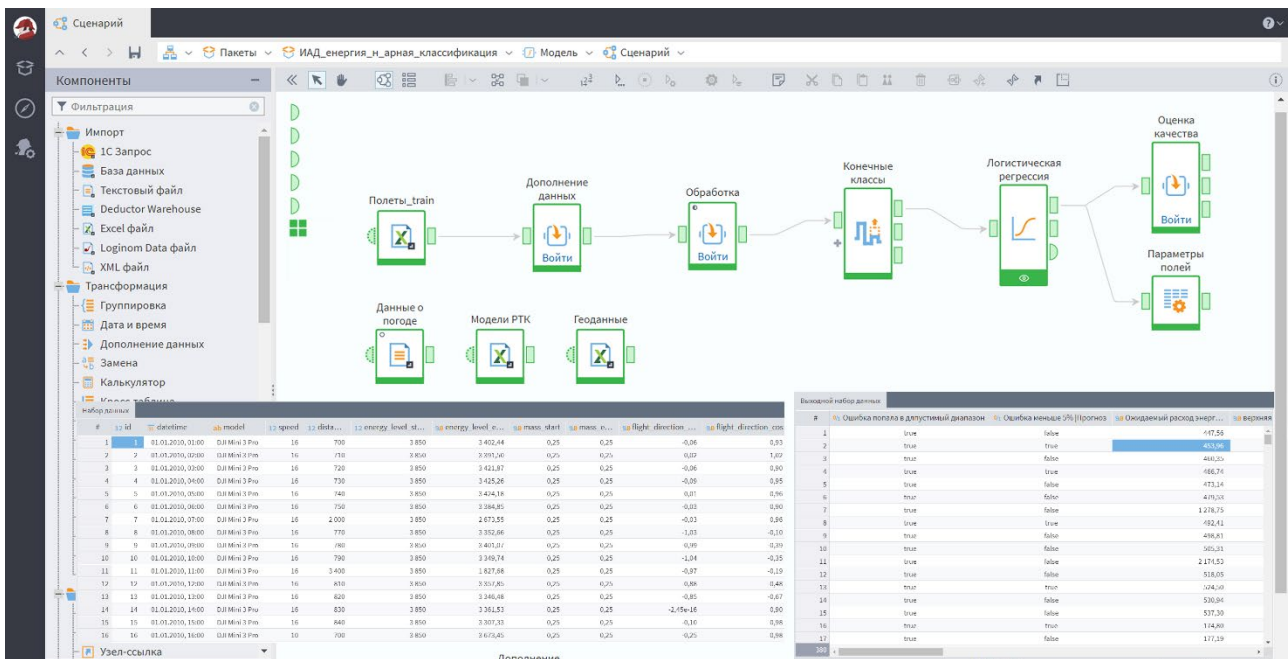


Рис. 4. Реализация фрагмента конвейера анализа данных на платформе Loginom
Fig. 4. Implementation of a fragment of data analysis pipeline on the Loginom platform

Для экспериментальной проверки был сформирован набор обучающих данных, который содержал 380 записей, включающих геопространственные данные и данные о погоде, полученные из открытых источников и дополненные синтетическими данными о маршрутах полетных заданий и характеристиках БПЛА. В качестве данных о погоде в обучающий набор были включены данные о скорости и направлении ветра, а из доступной геопространственной информации была использована разность высот. Аналогичным образом был подготовлен тестовый набор данных, содержащий 200 записей, таким образом, общий объем данных составил 580 записей.

В процессе построения модели была выполнена оценка значимости полей набора данных с применением метода биннинга [13], для включения в итоговую версию модели были отобраны поля, имеющие наибольшую значимость. Их описание приведено в табл. 1.

Данные, используемые для построения модели

Таблица 1

Table 1

Data used for model building

Название поля	Тип данных	Описание
Скорость полета, м/с	Вещественное число	Средняя скорость БПЛА в рамках полетного задания
Направление полета	Пара вещественных чисел	Синус и косинус угла, задающего направление полета БПЛА
Расстояние, м	Вещественное число	Протяженность маршрута
Сухая масса БПЛА, кг	Вещественное число	Сухая масса БПЛА в соответствии с его техническими характеристиками
Скорость ветра, м/с	Вещественное число	Скорость ветра вдоль маршрута полета
Направление ветра	Пара вещественных чисел	Синус и косинус угла, задающего направление ветра вдоль маршрута полета
Перепад высот, м	Вещественное число	Разница высот над уровнем моря между точкой начала полета и точкой его окончания
Расход заряда, мА·ч	Вещественное число	Прогнозируемая величина, равная разности между уровнем заряда в начальной и конечной точках полета

Перед началом обучения моделей логистической регрессии была выполнена нормализация полей данных с целью приведения значений к интервалу [0, 1]. При обучении модели использовался метод кросс-валидации K-fold со случайным сэмпингом и количеством колод кросс-валидации равным 5. Для отбора факторов и защиты от переобучения использовался метод гребневой регрессии. Для найденных коэффициентов модели выполнялась денормализация, при этом поправка на долю событий делалась на основе обучающего множества.

Для предобработки значений непрерывных величин, таких как расстояние и скорость, использовался модуль платформы Loginom «Конечные классы», который реализует процедуру биннинга [13] (рис. 5). Использование набора меток множеств вместо непрерывного ряда положительно сказывается на точности модели. Кроме того, процедура формирования конечных классов связана с определением статистических характеристик WoE и IV, которые позволяют судить о «вкладе» отдельных полей в формирование выходного значения. Эта информация может быть в дальнейшем использована для уточнения зависимости (1), за счет выделения дополнительных факторов, оказывающих влияние на величину расхода заряда.

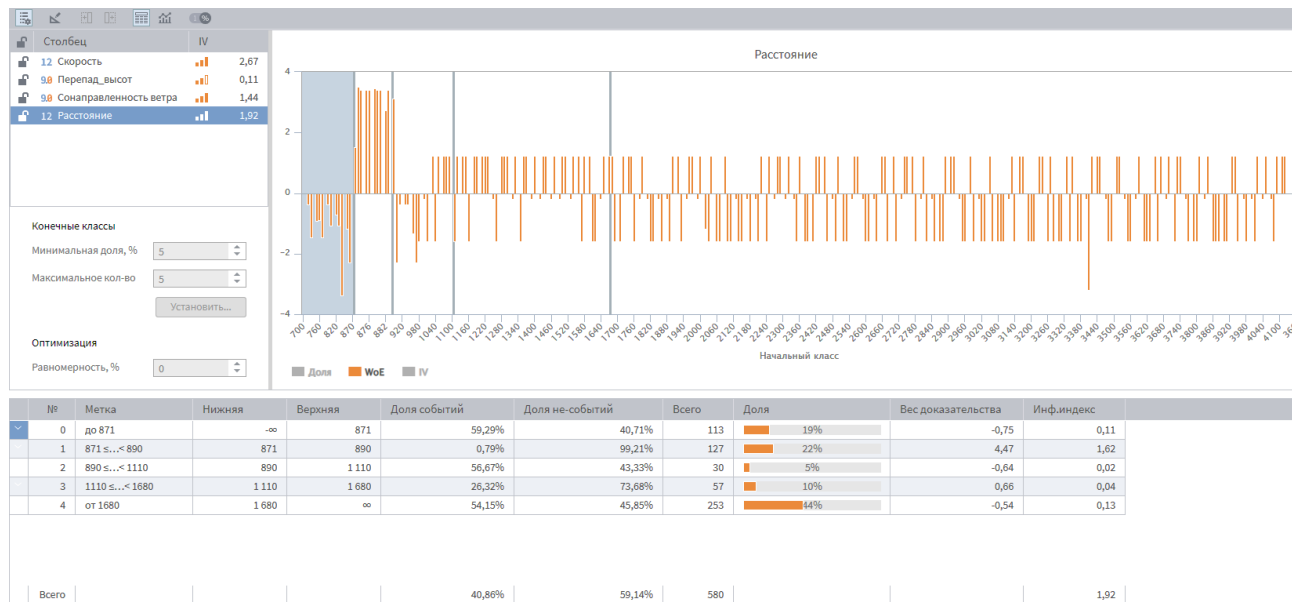


Рис. 5. Пример работы модуля «Конечные классы»
Fig. 5. An example of operation of “Finite classes” module

На рис. 6 представлены количественные результаты обучения модели в среде Loginom: ROC-кривая, оценки классификации и матрицы ошибок [12]. Для каждой модели логистической регрессии в роли события выступало попадание фактического значения расхода заряда C в соответствующий интервал D_i . В результате применения обученной модели к тестовым данным ее предсказательная сила составила порядка 65 %, что является приемлемым результатом.

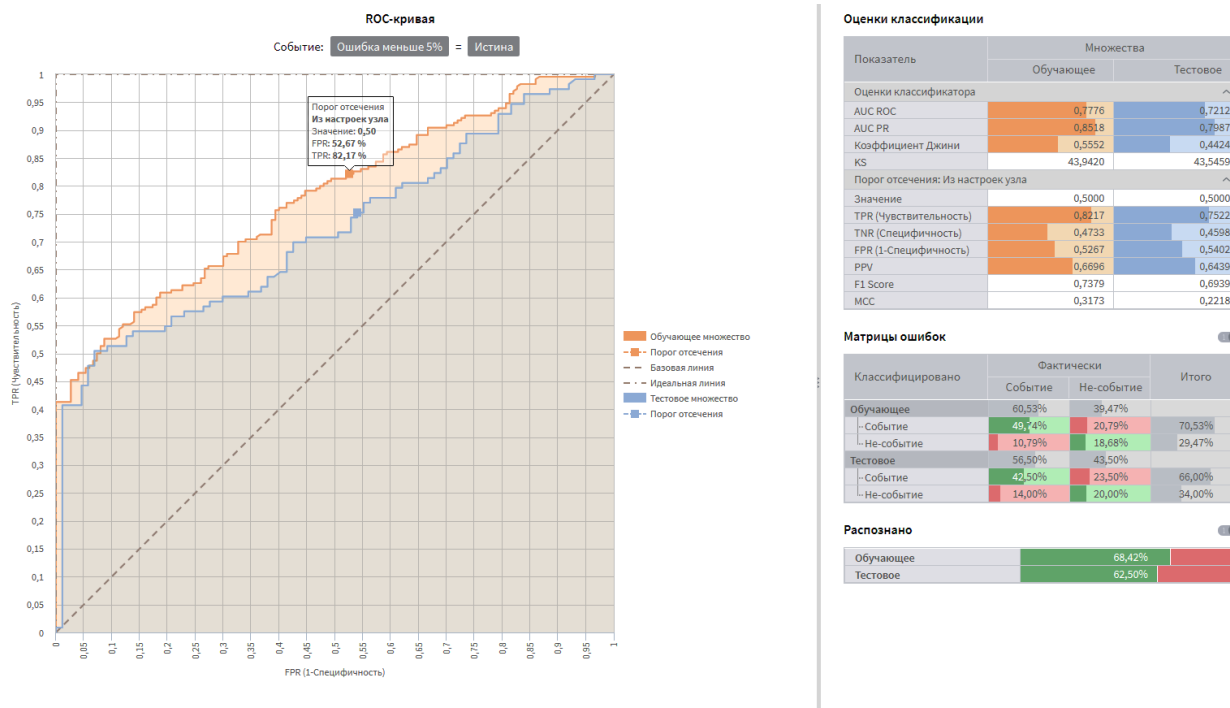


Рис. 6. Результаты обучения модели
Fig. 6. Model training results

Заключение

В статье предложен подход к построению модели оценки расхода заряда аккумулятора БПЛА при его полете по заданному маршруту, с учетом погодных условий и геопространственных характеристик. В рамках данного подхода оценочное значение вычисляется с использованием приближенной зависимости, и далее для этого значения находится доверительный интервал, с наибольшей вероятностью содержащий фактическое значение расхода. Для нахождения указанного интервала используются обучающие данные и метод бинарной классификации с применением моделей логистической регрессии. Построен конвейер, объединяющий механизмы построения, обучения и применения модели оценки. Рассмотрена реализация данного конвейера средствами аналитической платформы Loginom.

В качестве направлений совершенствования предложенного подхода можно отметить поиск путей повышения точности модели оценки и ее предсказательной силы, за счет расширения состава обучающих данных, включения дополнительных полей, характеризующих погодные условия и геопространственные характеристики маршрута. Также интерес представляет апробация построенной модели оценки на реальных данных летных экспериментов.

Список источников:

1. Арзамасцев А.А., Крючков А.А. Математические модели для инженерных расчетов летательных аппаратов мультироторного типа (часть 1) // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19. – № 6. – С. 1821-1828.
2. Арзамасцев А.А. Математические модели для инженерных расчетов летательных аппаратов мультироторного типа (часть 2). Задачи маршрутизации // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20. – № 2. – С. 465-468.
3. Курбанов Р.К. Алгоритм расчета времени полета беспилотного воздушного судна для проведения аэросъемки // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 35-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-35-40.
4. Матюха С.В. Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках // Транспортное дело России. – 2022. – № 1. – С. 141-143.
5. Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л. Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3-15.
6. Mubashir Iqbal M., Anwar Ali Z, Khan R, Shafiq M. Motion Planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. In: Z.A. Ali and D. Cvetković (Eds.) *Aeronautics – New Advances*. IntechOpen. 2022. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/82985>.
7. Liu D., Du Z., Liu X., et. al. Task-Based Network Reconfiguration in Distributed UAV Swarms: A Bilateral Matching Approach. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2022; 30(6): 2688-2700.
8. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». – 2016. – № 2. – С. 7-15.

References:

1. Arzamastsev A.A., Kryuchkov A.A. Mathematical Models for Engineering Calculations of Aircrafts of Multi-Rotor Type (Part 1). *Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences.* 2014;19(6): 1821-1828.
2. Arzamastsev A.A. Mathematical Models for Engineer Calculations of Aircraft of Multi-Rotor Type (Part 2). *The Aims of Routing.* Tambov University Review. Series: Natural and Technical Sciences. 2015;20(2):465-468.
3. Kurbanov R.K. Algorithm for Calculating the Flight Time of an Unmanned Aerial Vehicle for Aerial Photography. *Agricultural Machinery and Technologies.* 2023;17(1):35-40. doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-35-40.
4. Matyukha S.V. Unmanned Aerial Systems in Cargo Transportation. *Transport Business of Russia.* 2022;1:141-143.
5. Zakharova A.A., Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V., Podvesovskiy A.G., Smolin A.L. Modeling Cargo Transportation Tasks in an Unmanned Air Transportation System. *Aerospace Instrument-Making.* 2023;3:3-15.
6. Mubashir Iqbal M, Anwar Ali Z, Khan R, Shafiq M. Motion Planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. In: Ali ZA, Cvetković D, editors. *Aeronautics – New Advances*. IntechOpen [Internet]. 2022. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/82985>
7. Liu D, Du Z, Liu X, et. al. Task-Based Network Reconfiguration in Distributed UAV Swarms: A Bilateral Matching Approach. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2022;30(6):2688-2700.
8. Gorbunov A.A., Galimov A.F. The Influence of Meteorological Factors on the Use and Flight Safety of Unmanned Aerial Vehicle with Side Repeater Radio. *Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia.* 2016;2:7-15.

9. Алешин И.М., Дорожков В.В., Дьяков В.В., Передерин Ф.В., Холодков К.И. Влияние погодных условий на БПЛА-измерения // Динамические процессы в геосферах. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 89-98.

10. Zeng Y., Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2017; 16(6): 3747–3760.

11. Федоров И.Г. Нотация BPMN 2.0. Стандарт ISO/IEC 19510:2013 для создания исполняемых моделей бизнес-процессов. – М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2018. – 263 с.

12. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.

13. Guoping Z. A Necessary Condition for a Good Binning Algorithm in Credit Scoring. *App. Math. Sci.*, 2014; 8(65): 3229-3242.

14. Аналитическая платформа Loginom: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://loginom.ru/platform> (дата обращения: 15.04.2024).

15. Российский реестр программного обеспечения: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://reestr.digital.gov.ru/> (дата обращения: 15.04.2024).

9. Aleshin I.M., Dorozhkov V.V., Dyakov V.V., Perederin F.V., Kholodkov K.I. UAV Surveys in Cold Weather. *Dynamic Processes in Geospheres*. 2023;15(2):89-98.

10. Zeng Y., Zhang R. Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization. *IEEE Trans. Wireless Communication*. 2017;16(6): 3747-3760.

11. Fedorov I.G. Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0. Standard ISO/IEC 19510:2013 for Creating Executable Business Process Models. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2018.

12. Paklin N.B., Oreshkov V.I. Business-Analytics: From Data to Knowledge. St. Petersburg: Peter; 2013.

13. Guoping Z. A Necessary Condition for a Good Binning Algorithm in Credit Scoring. *App. Math. Sci.*, 2014;8(65):3229-3242.

14. Analytical Platform Loginom [Internet] [cited 2024 Apr 15]. Available from: <https://loginom.ru/platform>

15. Russian Software Register [Internet] [cited 2024 Apr 15]. Available from: <https://reestr.digital.gov.ru/>

Информация об авторах:

Подвесовский Александр Георгиевич

доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, Scopus-Author ID: 56367146100, Research-ID-Web of Science: L-5247-2015, Author-ID-РИНЦ: 195986

Лагереv Дмитрий Григорьевич

доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, Scopus-Author ID: 57188847381, Research-ID-Web of Science: U-2961-2019, Author-ID-РИНЦ: 569543.

Филонов Александр Андреевич

магистрант кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета.

Information about the authors:

Podvesovskiy Alexander Georgievich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department “Computer Science and Software” of Bryansk State Technical University, Scopus-AuthorID: 56367146100, Research-ID-Web of Science: L-5247-2015, Author-ID-RSCI: 195986

Lagerev Dmitry Grigoryevich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Computer Science and Software” of Bryansk State Technical University, Scopus-AuthorID: 57188847381, Research-ID-Web of Science: U-2961-2019, Author-ID-RSCI: 569543.

Filonov Alexander Andreevich

Master’s student at the Department “Computer Science and Software” of Bryansk State Technical University.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

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

Статья поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 03.06.2024.

The article was submitted 03.05.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 03.06.2024.

Рецензент – Голованов В.В., кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «АйТи Про».

Reviewer – Golovanov V.V., Candidate of Technical Sciences, CEO, LTD «IT Pro».

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.89

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-45-53

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Михаил Александрович Стрижко

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

strizhko.mihail@yandex.com, <https://orcid.org/0009-0007-2702-5194>

Аннотация. Предложен способ нейросетевого прогнозирования загруженности участков дороги вне зон контроля детекторов транспорта в системах «гибкого» управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. Описан принцип работы исходной системы управления на основе нечеткой логики. Для разработки универсального нейросетевого решения, которое может быть применено для прогнозирования трафика на большинстве участков дорог с распространенными характеристиками без необходимости обучения для каждого случая в отдельности, предложено выделить 9 основных типов участков и, соответственно, 9 нейронных сетей. Каждая типовая нейронная сеть отличается объемом входных данных и параметрами. Все нейронные сети обучаются на выборках, полученных при анализе транспортного потока на участках дорог каждого типа. Определены типовые характеристики участков дорог, архитектура и параметры нейронных сетей. Произведено обучение и тестирование нейронных сетей на модельных данных. Методами имитационного компьютерного моделирования произведена оценка качества управления исходной интеллектуальной системой светофорного регулирования, имеющей полную информацию о транспортном потоке (однако труднореализуемой на практике), а также системы управления, использующей совокупность данных, полученных при помощи детекторов транспорта и дополненных нейросетевым прогнозом. По результатам эксперимента система с нейросетевым прогнозом загруженности участков дороги по сравнению с идеализированной системой по качеству управления уступает не более, чем на 1,92 %, что даёт основания считать данный способ применимым в интеллектуальных системах управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием.

Ключевые слова: транспортный поток, система управления, прогнозирование, нейронная сеть, временной ряд, участок дороги

Для цитирования: Стрижко М.А. Нейросетевое прогнозирование параметров транспортных потоков в интеллектуальных системах светофорного регулирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 45-53. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-45-53.

Original article

Open Access Article

NEURAL NETWORK FORECASTING OF TRANSPORT FLOW PARAMETERS IN INTELLIGENT TRAFFIC LIGHT CONTROL SYSTEMS

Mikhail A. Strizhko

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

strizhko.mihail@yandex.com, <https://orcid.org/0009-0007-2702-5194>

Abstract. A method is proposed for neural network prediction of congestion on road sections outside the control zones of transport detectors in the systems of “flexible” transport flow control at intersections with the traffic light regulation. The paper describes the operating principle of the original control system based on fuzzy logic. To develop a universal neural network solution that can be used to predict traffic on most road sections with common characteristics without the need for training for each case separately, it is proposed to identify 9 main types of sections and, accordingly, 9 neural networks. Each typical neural network differs in the amount of the input data and parameters. All neural networks are trained on samples obtained from analyzing traffic flow on road sections of each type. Typical characteristics of road sections, architecture, and parameters of neural networks are determined. Neural networks are trained and tested on the model data. Using computer simulation methods, the author assesses the control quality of the original intelligent traffic light control system, which has complete information about the transport flow (however, it is difficult to implement in practice), as well as a control system that uses a set of data obtained using transport detectors and supplemented with a neural network forecast. According to the experiment results, a system with a neural network fore-

cast of congestion on road sections is inferior in quality of control by no more than 1.92% compared to an idealized system, which gives grounds to consider this method applicable in intelligent transport flow control systems at intersections with traffic light regulation.

Keywords: transport flow, control system, forecasting, neural network, time series, road section

For citation: Strizhko M.A. Neural Network Forecasting of Transport Flow Parameters in Intelligent Traffic Light Control Systems. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 45-53. doi: 10.30987/2658-6436-2024-1-45-53.

Введение

В условиях быстро возрастающей загруженности дорожной сети в мегаполисах все более острой становится проблема возникновения заторов и увеличения транспортных задержек. Одно из решений данной проблемы заключается в разработке систем «гибкого» управления транспортными потоками, которые учитывают интенсивность движения на подъездах к перекрестку в реальном времени и на основании полученных данных определяют длительности фаз регулирования. Управление движением на перекрестках, осуществляемое сотрудником полиции, является примером наиболее гибкого регулирования, а современные технические средства позволяют увеличить объем информации о трафике и повысить за счет этого качество управления. Однако для получения необходимых статистических данных, как правило, требуется наличие достаточно большого количества детекторов транспорта, что приводит к повышению затрат на реализацию и дальнейшее обслуживание систем управления, возникновению трудностей с установкой и настройкой оборудования. В связи с этим актуальной является проблема прогнозирования параметров транспортного потока в тех зонах дорожной сети городов, где получение этой информации при помощи соответствующего оборудования затруднено.

Описание системы управления

В статье выполняется научно-исследовательская работа по синтезу интеллектуальных систем управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием [1]. Система управления, основанная на нечеткой логике, предполагает разделение дорожной сети на подъездах к перекрестку на участки с присвоением номера каждому из них по удалению от перекрестка и классификацию загруженности каждого участка категориями МАЛО МАШИН (S), СРЕДНЕ МАШИН (M), МНОГО МАШИН (B). При помощи нечеткой логики по номеру участка определяется принадлежность каждой категории загруженности к нечетким множествам БЛИЗКО, СРЕДНЕ, ДАЛЕКО. Выходной переменной системы является уровень целесообразности переключения фазы регулирования в текущий момент времени в диапазоне от 0 до 1. Если значение данной величины превышает 0,5, происходит смена фазы регулирования для пропуска транспорта в конфликтующем направлении. В противном случае продолжается текущая фаза регулирования. Классификация входных данных разработанной системы управления представлена на рис. 1.

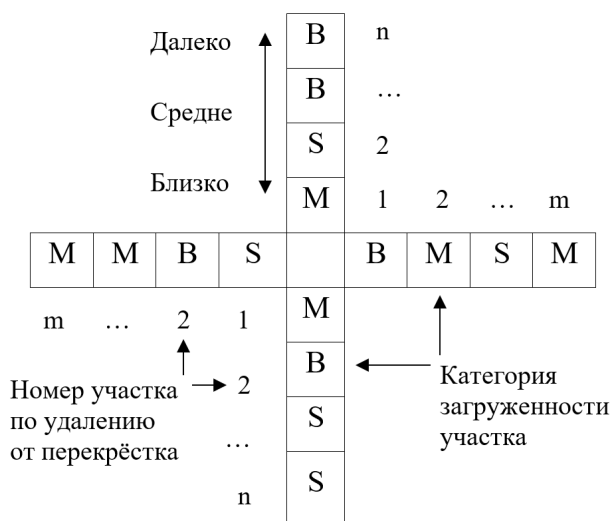


Рис. 1. Классификация входных данных системы управления
Fig. 1. Classification of control system input data

Данный подход позволяет учитывать разрывы и микроколебания транспортного потока, возникающие вследствие взаимосвязи перекрестка с соседними светофорными объектами, с целью повышения эффективности пропуска транспортных средств.

Необходимая дальность обнаружения транспортных средств на подъездах к перекрестку может быть определена исходя из следующих соображений: системе необходимо обнаружить все транспортные средства, движение которых будет прервано при включении запрещающей фазы регулирования на минимальную продолжительность. С учетом ограничения скорости в зоне обнаружения трафика перед перекрестком данная величина может быть вычислена по формуле (1). Минимальная продолжительность запрещающей фазы регулирования на практике рассчитывается с учетом ширины проезжей части и скорости движения пешеходов по формуле (2) [2].

$$l_{\text{обн}} = t_{\text{min}} \cdot V, \quad (1)$$

где $l_{\text{обн}}$ – дальность обнаружения транспортных средств; t_{min} – минимальная длительность запрещающей фазы регулирования; V – ограничение максимальной скорости на данном участке.

$$t_{\text{min}} = 5 + B_{\text{пш}}/V_{\text{пш}}, \quad (2)$$

где t_{min} – длительность фазы регулирования с учетом движения пешеходов; $B_{\text{пш}}$ – ширина проезжей части в месте пешеходного перехода; $V_{\text{пш}}$ – средняя скорость пешехода (обычно принимается равной 1,3 м/с);

Так, при минимальной продолжительности запрещающей фазы регулирования равной 15 с и ограничении скорости в 60 км/ч (16,67 м/с) необходимая дальность обнаружения транспортных средств на подъезде к перекрестку составит 250 м.

Большинство современных детекторов транспорта в условиях города имеют радиус действия 40...100 м. Расстояние между светофорными объектами в городе может достигать 500 м и более. Таким образом, детекторы транспорта, установленные навстречу друг другу на соседних перекрестках, часто не способны получать данные о загруженности всей необходимой зоны обнаружения. Пример расположения участков с обнаружением трафика и «слепых» участков приведен на рис. 2.

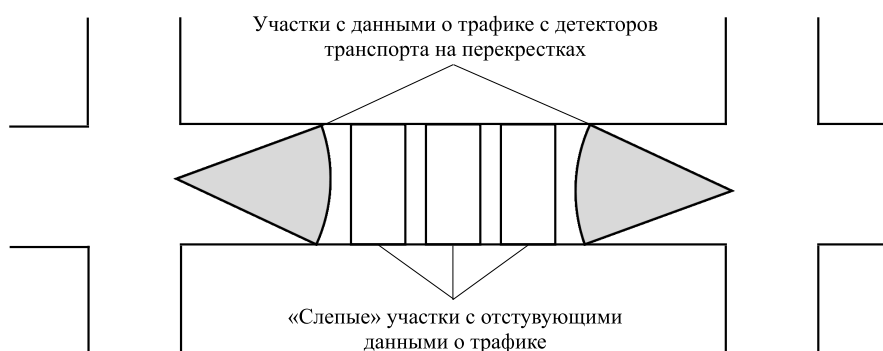


Рис. 2. Отслеживаемые и «слепые» участки проезжей части между перекрестками
 Fig. 2. Monitored and "blind" sections of the road between intersections

Решением данной проблемы может быть установка дополнительных детекторов транспорта, что приводит к повышению затрат на реализацию системы. Альтернативным вариантом является применение методов прогнозирования загруженности «слепых» участков на основании имеющейся информации о загруженности соседних участков.

Способ нейросетевого прогнозирования загруженности участков дорожной сети

Прогнозирование временных рядов может быть реализовано различными способами, среди которых наиболее распространенными являются методы экстраполяции и машинного

обучения. Как правило, они основаны на использовании предыдущих значений временного ряда для прогнозирования текущих или будущих значений. Среди методов экстраполяции выделяют метод скользящей средней [3], экспоненциальное сглаживание [4] и метод Хольта-Винтерса [5]. Методы машинного обучения основаны на применении нейросетей [6 – 8]. Обычно они являются более точными, чем методы экстраполяции. Также, наряду с предыдущими значениями прогнозируемого временного ряда, они позволяют учитывать значения других временных рядов, оказывающих влияние на рассматриваемый. Однако применение нейронных сетей предполагает их обучение на каждом участке дороги, что при массовом применении данного метода требует большого объема вычислительных ресурсов системы, и возможности получения обучающих данных на каждом отдельном участке, что при отсутствии стационарных детекторов транспорта весьма затруднительно. Для решения проблемы предлагается выделить типовые участки дорожной сети с определенными параметрами трафика и использовать ограниченное количество нейросетей, с различными параметрами и обучающими данными для прогноза транспортного потока на участке каждого типа.

Основными характеристиками участка дорожной сети приняты:

- длина участка;
- ограничение максимальной скорости движения на участке;
- количество полос движения в одном направлении.

Расстояние между перекрестками может быть любым в достаточно широких пределах, в связи с этим длина участка также варьируется и типизировать её затруднительно. Принимая равными длины участков с прогнозируемым трафиком и участков, обслуживаемых детекторами транспорта, можно установить, длина одного участка не превышает дальность действия детектора транспорта и равна отношению расстояния между перекрестками к количеству участков (3).

$$l_{\text{уч}} = S/n \leq R_{\text{дт}}, \quad (3)$$

где $l_{\text{уч}}$ – длина одного участка; S – расстояние между перекрестками; n – количество участков между перекрестками; $R_{\text{дт}}$ – дальность действия детектора транспорта.

Дальность действия одного из распространенных радиолокационных детекторов транспорта составляет 42,7 м. Принимая данное значение в качестве ограничения максимальной длины участка, рассчитаем количество участков для диапазона расстояний между перекрестками от 200 до 500 м с округлением до большего целого. График зависимости количества участков, ограниченных дальностью действия детектора транспорта, от расстояния между перекрестками представлен на рис. 3.

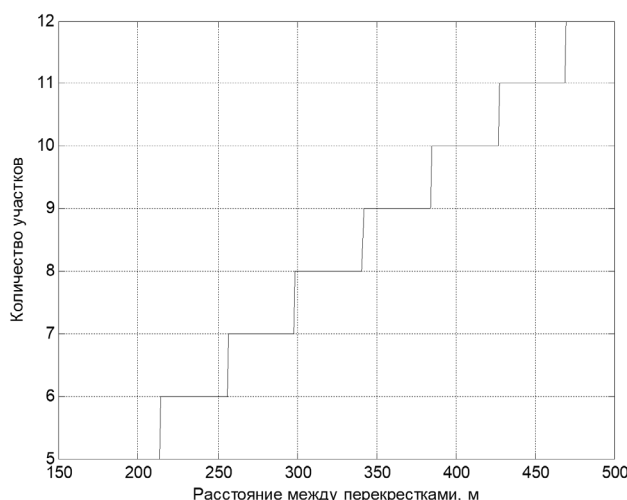


Рис. 3. Зависимость количества участков проезжей части от расстояния между перекрестками
Fig. 3. Dependence of the number of road sections on the distance between intersections

Для того же диапазона расстояний между перекрестками рассчитана длина участка с установленным ограничением в 42,7 м (рис. 4).

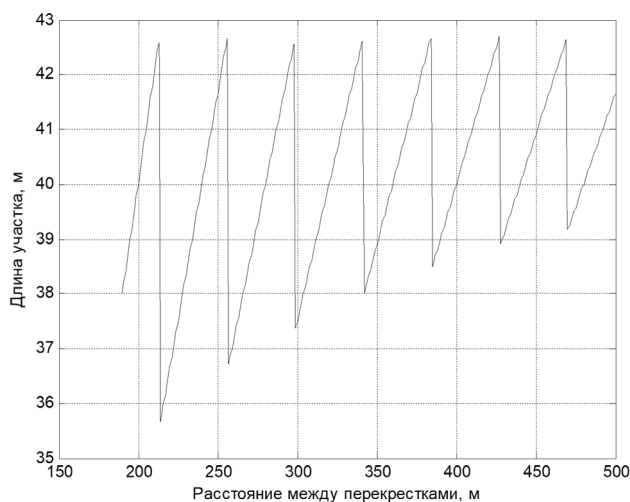


Рис. 4. Зависимость длины участка проезжей части от расстояния между перекрестками
Fig. 4. Dependence of the road section length on the distance between intersections

Из графика видно, что длина участка варьируется в диапазоне от 36 до 42,7 м. Таким образом, максимальная разница между возможными значениями длины участка составляет 6,7 м в диапазоне изменения расстояния между перекрестками от 200 до 250 м. Принимая среднюю длину легкового транспортного средства равной 4,2 м [9], а безопасную дистанцию между автомобилями равной 3 м [10] (в сумме 7,2 м), можно сделать вывод, что вариация длины участка в 6,7 м может внести погрешность в прогнозируемое количество транспортных средств лишь на 1 единицу. Таким образом, длину участка для расстояний между перекрестками в диапазоне от 200 до 500 м можно установить усредненной, равной 39,6 м. При этом допускается пересечение участков или образование зазора между ними для равномерного покрытия всего расстояния между перекрестками.

В условиях российского города наиболее распространены 3 варианта ограничения скорости: 40, 50 и 60 км/ч. По количеству полос движения в одном направлении выделяются участки с 1, 2 и 3 полосами.

Таким образом, получены 9 различных типов участков, прогнозирование транспортного потока на которых требует применения нейросетей с различными параметрами, обученные на различных наборах данных.

Для прогнозирования трафика предлагается использовать нелинейную регрессионную нейросеть прямого распространения. Текущее значение переменной $y(t)$ необходимо спрогнозировать на основании прошлых значений переменных $x_{11}(t) \dots x_{1i}(t), x_{21}(t) \dots x_{2i}(t)$. Выходная переменная $y(t)$ – количество автомобилей на участке на одной полосе движения, подлежащее восстановлению при помощи прогноза. Входная переменная $x_{1i}(t)$ – количество автомобилей на вышестоящем соседнем участке с известными параметрами транспортного потока по i -ой полосе движения. Входная переменная $x_{2i}(t)$ – количество автомобилей на нижестоящем соседнем участке с известными параметрами транспортного потока по i -ой полосе движения. Данная модель может быть описана формулой (4).

$$y(t) = f(x_{11}(t - 1), \dots, x_{11}(t - d), \dots, x_{1i}(t - 1) \dots x_{1i}(t - d), x_{21}(t - 1), \dots, x_{21}(t - d), \dots, x_{2i}(t - 1) \dots x_{2i}(t - d)) \quad (4)$$

Нейросеть состоит из входного, скрытого и выходного слоев. Входной вектор задержек определяет какое количество прошлых значений входных переменных должно учитываться при прогнозе выходной переменной. Количество нейронов на скрытом слое определяется для нейросети каждого типа, исходя из количества полос в одном направлении движения. Архитектура нейронной сети представлена на рис. 5.

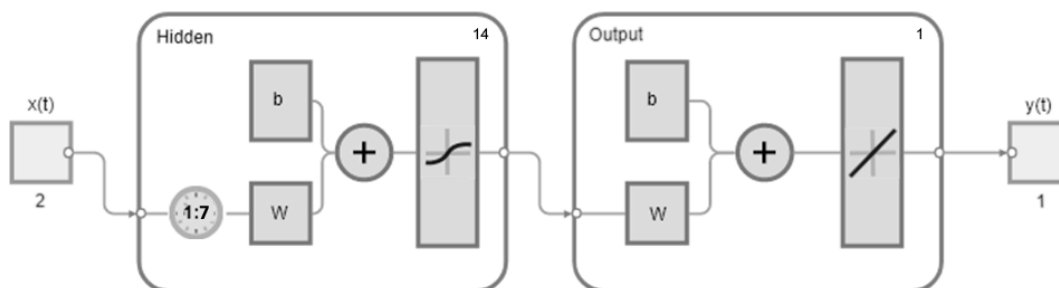


Рис. 5. Архитектура нейронной сети для прогнозирования трафика
 Fig. 5. Traffic forecasting neural network architecture

Параметры нейросети для использования на участках различных типов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры нейросети, требуемые для использования на участках различных типов

Table 1

Neural network parameters required for use on different types of sections

Ограничение скорости на участке	Количество полос на участке	Количество входов нейросети	Количество нейронов на скрытом слое
60 км/ч	1	14	14
	2	28	28
	3	42	42
50 км/ч	1	14	14
	2	28	28
	3	42	42
40 км/ч	1	14	14
	2	28	28
	3	42	42

При движении автомобилей со скоростью 60 км/ч участок длиной 39,6 м будет преодолен приблизительно за 2 с. Так как средняя скорость транспортного потока, как правило, меньше ограничения максимальной скорости, вектор задержек увеличен до 7 с. Принимая шаг дискретизации задержек равным 1 с, для двух отслеживаемых параметров на входе количество входных временных рядов составляет 14. Количество нейронов на скрытом слое также принимается равным 14. Размер вектора задержек в 7 с, выбранный для типа участков с ограничением скорости движения в 60 км/ч подходит для использования и на участках с меньшим ограничением скорости за счет запаса времени, но требуется использование различных обучающих выборок для каждого типа участка. Для участков с несколькими полосами движения количество отслеживаемых параметров увеличивается. В таком случае на вход нейросети поступают временные ряды по каждой полосе движения с вышестоящего и нижестоящего соседних участков. Количество входов и нейронов на скрытом слое увеличивается в 2 и в 3 раза и составляет 28 и 42.

Обучение нейронной сети и оценка качества прогнозирования

Для обеспечения наилучшего качества прогнозирования обучение нейросети должно осуществляться с использованием набора данных, полученных в реальных условиях при помощи детекторов транспорта. Однако ввиду того, что сбор статистической информации о транспортном потоке с использованием специального оборудования затруднителен, данные для обучения нейросети получены при помощи модели.

Обучающие выборки состоят из данных о количестве автомобилей на участках каждого типа за период в 10 000 с. Обучение нейросети производится методом Левенберга-Марквардта. Тестовая выборка содержит модельные данные о количестве автомобилей на других участках того же типа за период в 2000 с.

Качество прогнозирования оценивается на основании двух показателей: среднеквадратического отклонения между выходными данными нейросети и целевыми значениями S (4), а также коэффициента корреляции между данными величинами R (5).

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}; \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

где x – целевая выборка; y – прогнозная выборка; \bar{x} – среднее арифметическое целевой выборки; \bar{y} – среднее арифметическое прогнозной выборки; n – число элементов в выборке.

Показатели качества прогнозирования для участков каждого типа приведены в табл. 2. Результаты обучения нейросети для одного из типов участков проиллюстрированы на рис. 6.

Таблица 2

Показатели качества прогнозирования трафика на типовых участках проезжей части

Table 2

Traffic forecasting quality indicators on typical road sections

Ограничение скорости	Количество полос	S	R
60 км/ч	1	0,060	0,93
	2	0,083	0,91
	3	0,091	0,88
50 км/ч	1	0,059	0,93
	2	0,079	0,94
	3	0,088	0,90
40 км/ч	1	0,061	0,92
	2	0,080	0,94
	3	0,090	0,89

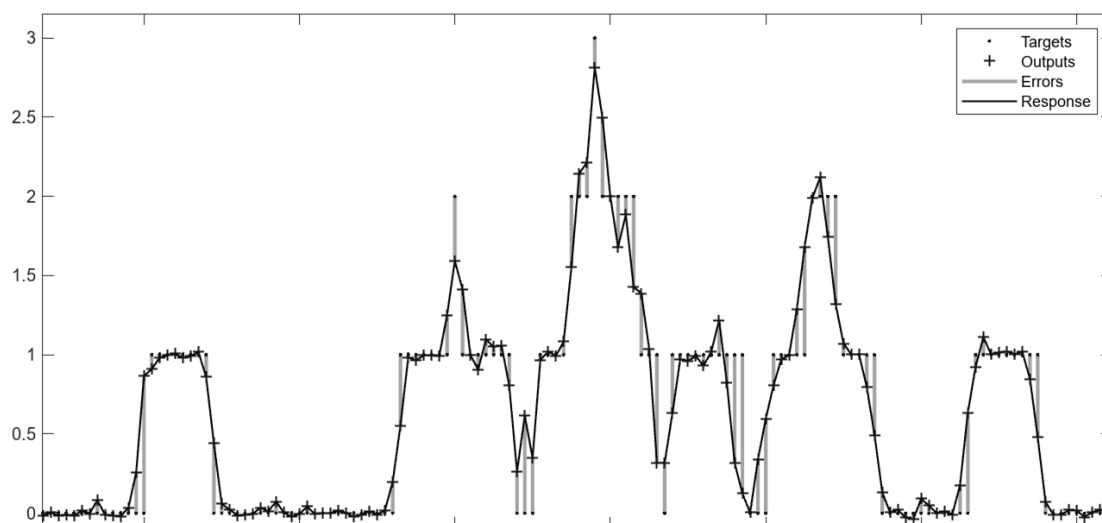


Рис. 6. График целевых и прогнозных данных нейросети

Fig. 6. Graph of target and forecast neural network data

Для оценки влияния применения нейросетевого прогнозирования трафика в разработанной системе на качество управления был проведен модельный эксперимент для системы, осуществляющей управление на основе полной информации о транспортном потоке (труднореализуемой на практике) и для разработанной системы управления, использующей прогнозные данные нейросети. Сравнение показателей качества исследуемых вариантов системы управления транспортными потоками приведено на рис. 7.

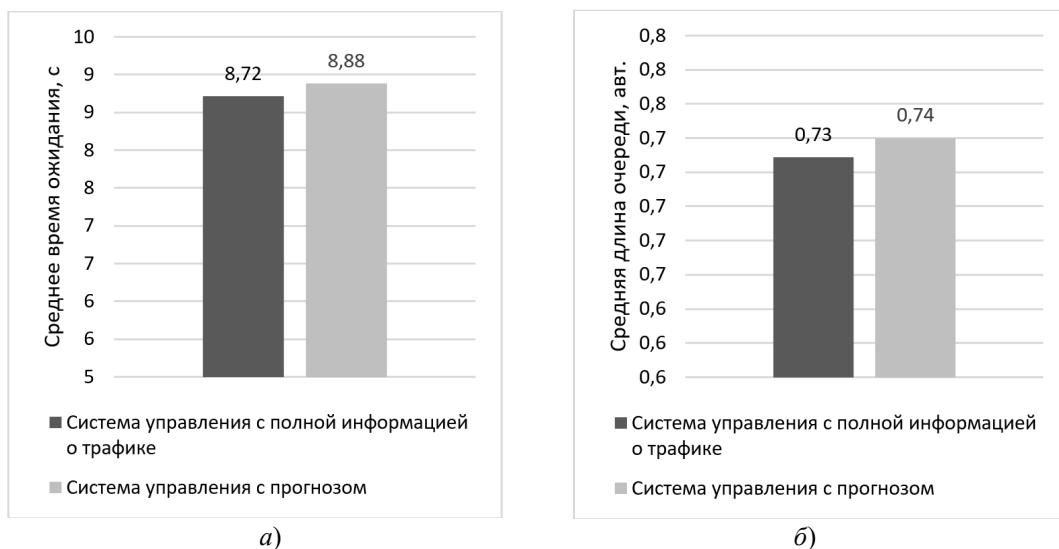


Рис. 7. Показатели качества исследуемых систем управления:

a – среднее время ожидания; *b* – средняя длина очереди

Fig. 7. Quality indicators of the control systems:

a – average waiting time; *b* – average queue length

Качество управления оценивалось по таким показателям, как среднее время ожидания и средняя длина очереди. Использование нейросетевого прогноза по качеству управления отличается в среднем на 1,92 % по обоим показателям по сравнению с системой с полной информацией о трафике.

Заключение

В работе предложен способ прогнозирования загруженности участка дороги на подъезде к перекрестку на основе нейронной сети для использования в системах «гибкого» управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. Описан принцип работы исходной системы управления. Для получения универсального решения предложено выделить 9 основных типов участков дорог и 9 нейросетей с различным объемом входных данных и различными параметрами, предварительно обученных на выборках, соответствующих трафику на участке каждого типа. Описан выбор типовых характеристик участков и параметров нейросети. Произведено обучение нейросети на данных, полученных при помощи модели, приведены результаты её проверки на тестовых модельных данных. Произведено моделирование и оценка качества управления исходной системы управления, имеющей полную информацию о транспортном потоке (труднореализуемой на практике), а также системы управления, использующей совокупность данных, полученных с детекторов транспорта и при помощи нейросетевого прогнозирования. По результатам эксперимента система с нейросетевым прогнозом загруженности участков дороги по качеству управления отличается в среднем на 1,92 % по сравнению с идеализированной системой. Таким образом, данный способ можно считать применимым для использования в системах управления транспортными потоками на перекрестках.

Список источников:

1. Стрижко М.А., Червинский В.В. Применение нечеткой логики в системах интеллектуального управления светофорами // Информатика и кибернетика. – 2022. – №2 (28). – С. 5–10.
2. ОДМ 218.4.005-2010 Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2011. 156 с.

References:

1. Strizhko M.A., Chervinsky V.V. Application of Fuzzy Logic in Intelligent Traffic Light Control Systems. Informatics and Cybernetics. 2022;2(28):5-10.
2. Recommendations for Ensuring Traffic Safety on Highways. Industry Road Guidance Document 218.4.005-2010. Moscow: Federal Road Agency (Rosavtodor); 2011.

3. Шилов А.В. Возможности и недостатки использования скользящей средней при выработке прогнозных решений // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2015. – № 19. – С. 88-94.
4. Ostertagová E., Ostertag O. Forecasting using simple exponential smoothing method. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2012;12(3):62–66.
5. Поздняков А.С. Применение метода Хольта-Винтерса при анализе и прогнозировании динамики временных рядов // Проблемы организации и управления на транспорте: Сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и их научных руководителей (материалы межвузовской научно-практической конференции), Екатеринбург, 03 ноября 2016 года. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 57-64.
6. Емалетдинова Л.Ю., Кабирова А.Н., Вильданов Н.Р. Нейросетевое моделирование задачи прогнозирования значений временного ряда // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 10. – С. 101-106.
7. Дауб И.С. Обзор методов прогнозирования временных рядов с помощью искусственных нейронных сетей // StudNet. – 2020. – Т. 3. – № 10. – С. 247–257.
8. Мейзер М.В., Северьянова Е.Д., Мокшин В.В. Пример прогнозирования временных рядов с помощью рекуррентной нейронной сети LSTM // Молодой ученый. – 2022. – № 9 (404). – С. 13-15.
9. Яковлев В.Ф. Учебник по устройству легкового автомобиля. М.: «Третий Рим», 2008. 78 с.
10. Михалева Л.В., Алексеева О.В., Гасилова О.С., Сидоров Б.А. Результаты определения минимального безопасного расстояния между легковыми автомобилями, движущимися в попутном направлении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 214–219.
3. Shilov A.V. Possibilities and Disadvantages of Using a Moving Average When Developing Forecast Decisions. *Priority Scientific Directions: From Theory to Practice*. 2015;19:88-94.
4. Ostertagová E., Ostertag O. Forecasting Using Simple Exponential Smoothing Method. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2012;12(3):62-66.
5. Pozdnyakov AS. Application of the Holt-Winters Method in Analyzing and Forecasting the Dynamics of Time Series. In: *Proceedings of the Interuniversity Scientific-Practical Conference on Problems of Organization and Management in Transport*; 2016 Nov 03; Yekaterinburg: Ural State Transport University: 2017. p. 57-64.
6. Emaletdinova L.Yu., Kabirova A.N., Vildanov N.R. Neural Network Modeling of the Problem of Predicting the Values of the Time Series. *Bulletin of the Technological University*. 2022;25(10):101-106.
7. Daub I.S. Review of Methods for Forecasting Time Series Using Artificial Neural Networks. *StudNet*. 2020;3(10):247-257.
8. Meizer M.V., Severyanova E.D., Mokshin V.V. Example of Time Series Forecasting with LSTM Recurrent Neural Network. *Young Scientist*. 2022;9(404):13-15.
9. Yakovlev V.F. *A Textbook on the Passenger Car Construction*. Moscow: Third Rome; 2008.
10. Mikhaleva L.V., Alekseeva O.V., Gasilova O.S., Sidorov B.A. Results Determination of the Minimum Safety Distance, Passenger Cars Moving in the Same Direction. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2011;4:214-219.

Информация об авторах:

Стрижко Михаил Александрович
аспирант кафедры «Автоматика и телекоммуникации» Донецкого национального технического университета

Information about the authors:

Strizhko Mikhail Aleksandrovich
postgraduate student at the Department “Automation and Telecommunications” of Donetsk National Technical University

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 25.04.2024; принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 20.03.2024; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 03.05.2024.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Управление в организационных системах

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.5. 061

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-54-64

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ СУДНА НА КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ

Михаил Алексеевич Мельников¹, Валерий Иванович Плющаев²

^{1,2} Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

¹ kaf_radio@vsuwt.ru, <http://orcid.org//0009-0006-4598-9934>

² kaf_radio@vsuwt.ru, <http://orcid.org//0000-0001-6120-3782>

Аннотация. Авторулевые являются неотъемлемой частью современных судов. Однако в настоящее время появляется много задач, в том числе в области безэкипажного судовождения, требующих использования новых алгоритмов управления и привлечения новых средств контроля навигационных параметров. В частности, для решения таких задач как удержание судна на заданной траектории, автоматизации расхождения судов и подобных, необходимо иметь средства непрерывного контроля местоположения судна. Для этого могут быть использованы приемники глобальных навигационных спутниковых систем. Для моделирования процессов управления необходимо знать распределение ошибок позиционирования современных приборов. Известны работы, где показано, что на длительных интервалах времени (сутки и более) погрешности позиционирования можно считать случайным процессом с гауссовским распределением. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований распределение ошибок позиционирования судового навигационного приемника, работающего в системах GPS и ГЛОНАСС, в совмещенном режиме GPS/ГЛОНАСС, а также в указанных режимах с дифференциальными поправками. Показано, что на временных интервалах секунды – минуты (характерных для судовых систем управления) погрешности позиционирования навигационного приемника нельзя представить случайным процессом с гауссовским законом распределения. Приведены результаты математического моделирования процесса удержания судна на заданной траектории с использованием экспериментальных значений погрешностей датчика позиционирования. Для исследований использована математическая модель инновационного судна с колесно-движительным рулевым комплексом. Создан алгоритм, позволяющий удерживать судно на заданной траектории с приемлемой для практического применения точностью, соизмеримой с отклонениями, определяемыми конструктивными особенностями корпуса судна и его движителей.

Ключевые слова: колесное судно, динамические характеристики судна, спутниковые навигационные системы, погрешности измерения, алгоритмы управления, качественные показатели процесса управления, безэкипажное судовождение

Для цитирования: Мельников М.А., Плющаев В.И. Влияние погрешностей измерения координат судна на качество процесса управления // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 54-64. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-54-64.

Original article

Open Access Article

ERROR INFLUENCE OF MEASURING THE SHIP'S COORDINATES ON THE CONTROL PROCESS QUALITY

Mikhail A. Melnikov¹, Valery I. Plyushchaev²

^{1,2} Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

¹ kaf_radio@vsuwt.ru, <http://orcid.org//0009-0006-4598-9934>

² kaf_radio@vsuwt.ru, <http://orcid.org//0000-0001-6120-3782>

Abstract. *Autopilots are an integral part of modern ships. However, at present, many tasks are emerging, including the ones in the unmanned navigation field, requiring the use of new control algorithms and new means of monitoring navigation parameters. In particular, to solve such problems as keeping a vessel on a given trajectory, automating the ships' divergence and similar tasks, it is necessary to have means of continuous monitoring of the ship's location. For this purpose, receivers of global navigation satellite systems can be applied. To model control processes, it is necessary to know the distribution of positioning errors of modern devices. Some works show that over long time intervals (a day or more), positioning errors can be considered a random process with a Gaussian distribution. This paper presents the experimental study results of the distribution of positioning errors of a ship navigation receiver operating in the GPS and GLONASS systems, in a combined GPS/GLONASS mode, as well as in the indicated modes with differential corrections. The paper shows that at time intervals of seconds – minutes (characteristic of ship's control systems), positioning errors of the navigation receiver cannot be represented by a random process with a Gaussian distribution law. The paper presents the results of a mathematical modelling of the process of holding a ship on a given trajectory using experimental values of positioning sensor errors. For the research, a mathematical model of an innovative ship with a wheel-propulsion steering complex is used. An algorithm is created that makes it possible to keep a vessel on a given trajectory with an accuracy acceptable for a practical use, commensurate with deviations determined by the design features of the ship's hull and its propulsors.*

Keywords: wheeled vessel, dynamic characteristics of the ship, satellite navigation systems, measurement errors, control algorithms, quality indicators of the control process, unmanned navigation

For citation: Melnikov M.A., Plyushchayev V.I. Error Influence of Measuring the Ship's Coordinates on the Control Process Quality. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 54-64. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-54-64.

Введение

В настоящее время для автоматического управления движением судна по курсу используются различные виды авторулевых [1, 2]. Несмотря на их различие, основным законом управления при автоматической стабилизации курса является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД). Основную информацию для формирования управляющих воздействий авторулевой получает от компаса и датчика угловой скорости. Авторулевые обеспечивают автоматическое ведение судна по заданному курсу в течение продолжительного времени, а также возможность изменения курса [2].

Реализация алгоритма управления движением судна по заданной траектории требует использования, кроме курса и угловой скорости вращения корпуса [3], дополнительных навигационных параметров. Для оценки величины отклонения от заданной траектории могут быть использованы глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС).

Цель данной статьи – изучить влияние погрешностей измерения координат судна с использованием ГНСС на качество процесса управления движением судна по заданной траектории.

Экспериментальные исследования погрешностей измерения координат с использованием ГНСС

В работах [4, 5] приведены результаты натуральных экспериментов по исследованию характеристик точности позиционирования навигационных приемников при их работе с системами ГЛОНАСС, GPS, а также в совмещенном ГЛОНАСС/GPS режиме. Измерения проводились на открытой местности с дискретностью 1 с в течении 8 суток [4] и 7 суток [5]. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены результаты измерений погрешности позиционирования с использованием системы ГЛОНАСС, полученных авторами [4]. На рис. 1, а – ошибки местоопределения в системе ГЛОНАСС на плоскости (где $\sigma_r = 4,7$ м – среднеквадратичная погрешность), на рис. 1, б показаны гистограммы распределения ошибок позиционирования соответственно по широте и долготе за 8 суток [4]. Аналогичные результаты (рис. 3, в), полученные за 7 суток, приведены в [5].

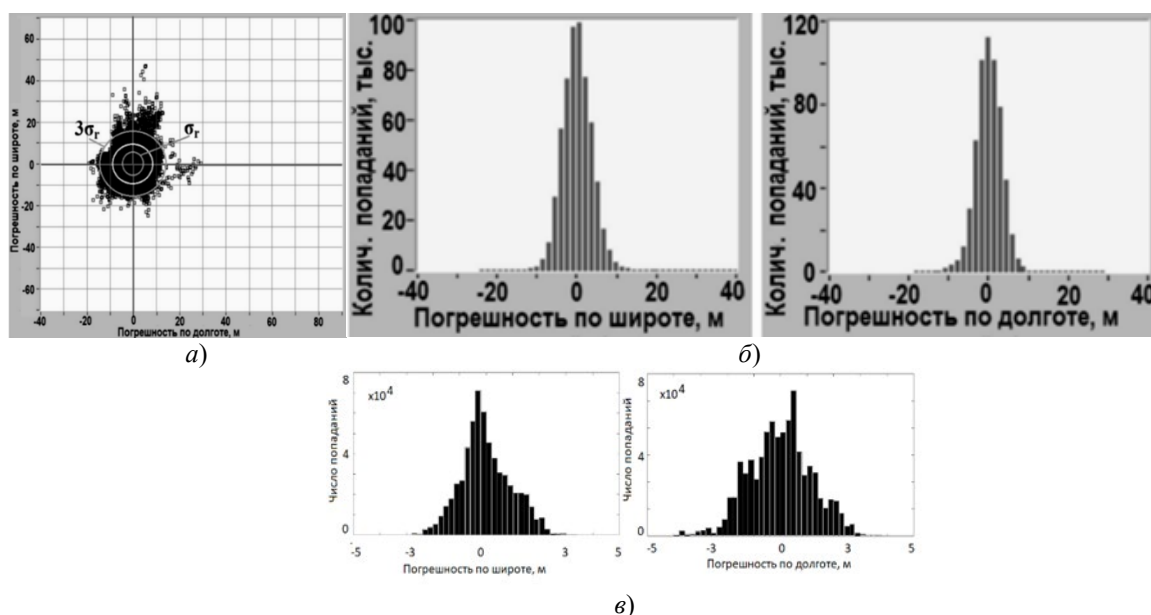


Рис. 1. Ошибки местопределения в системе ГЛОНАСС (по результатам [3, 4])
 Fig. 1. Location errors in the GLONASS system (based on the results of [3,4])

Полученные результаты позволяют авторам [4, 5] сделать вывод о возможности аппроксимации погрешностей позиционирования навигационного приемника при моделировании работы навигационной системы случайным процессом с гауссовским законом распределения (следует отметить, что результат получен на интервале измерения в 7...8 суток).

Однако при управлении движением судна по заданной траектории требуется генерации управляющих воздействий на движительно-рулевой комплекс с интервалами от нескольких до десятков секунд. Поэтому вопрос о возможности аппроксимации погрешностей позиционирования навигационного приемника случайным процессом с гауссовским законом распределения остается открытым.

Для экспериментальной проверки был использован судовой приемник «ТРАНЗАС Т-701», который может работать в системах GPS и ГЛОНАСС, в совмещенном режиме GPS/ГЛОНАСС, а также в указанных режимах с дифференциальными поправками (ДП) [6]. Антенна приемника была установлена на крыше 10-этажного здания (в радиусе 500 м все постройки меньшей этажности), т.е. погрешность многолучевого приема отсутствовала. Измерения в разных системах проводились одновременно в течении одного часа с дискретностью в 1 с.

Результаты статистической обработки измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты статистической обработки измерений

Table 1

The results of statistical processing of measurements

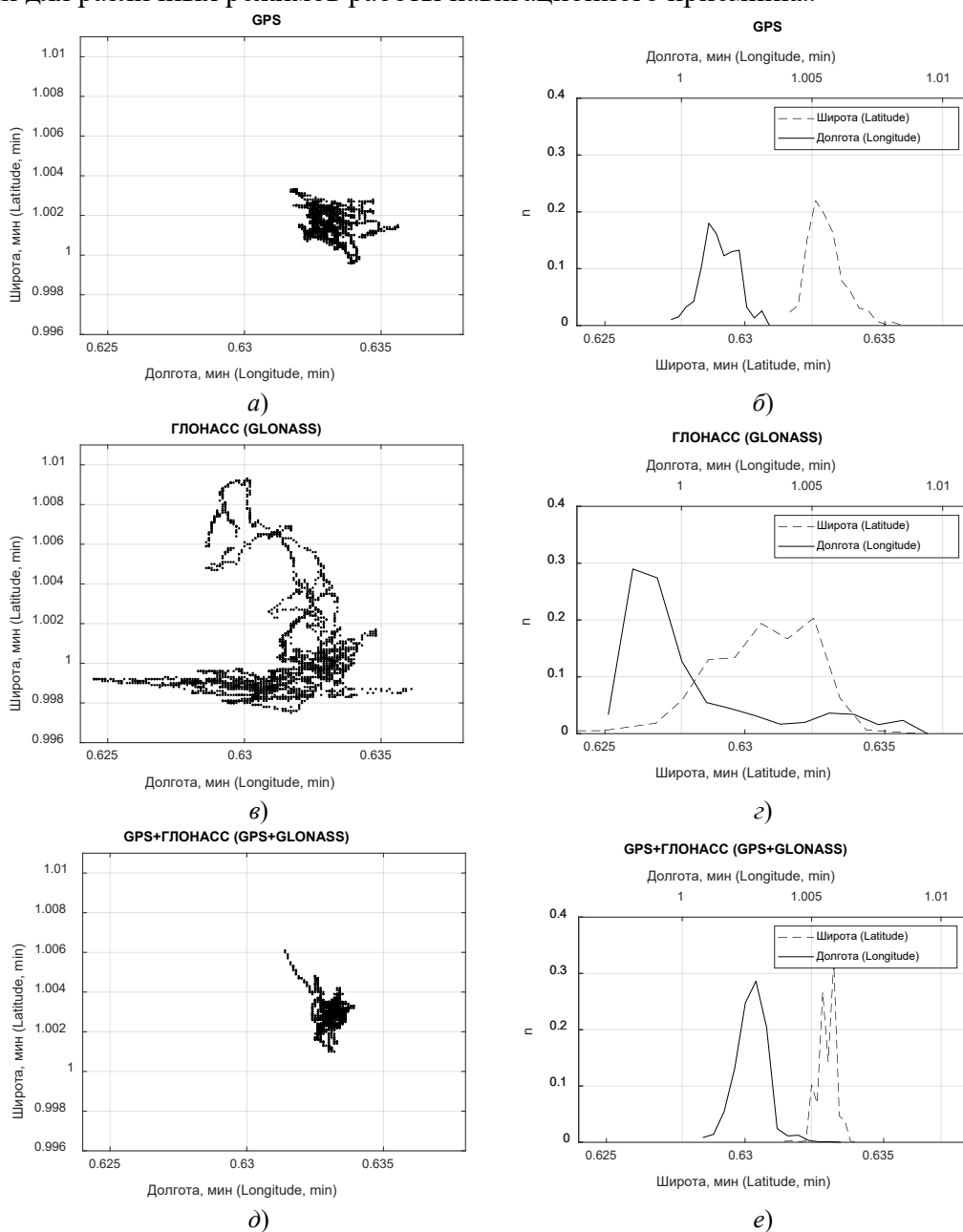
Параметр\Система		GPS	ГЛО-НАСС	GPS + ГЛО-НАСС	GPS + ГЛО-НАСС + ДП	GPS + ДП	ГЛО-НАСС + ДП
Среднее значение	Широта	56° 19,63305'	56° 19,63110'	56° 19,63306'	56° 19,63304'	56° 19,63328'	56° 19,63327'
	Долгота	044° 01,00160'	044° 01,00071'	044° 01,00290'	044° 01,00180'	044° 01,00097'	044° 00,99987'
	HDOP	1,020	1,890	0,750	0,900	1,220	1,030
Среднеквадратическое отклонение, σ , м	По широте	1,149	1,945	0,592	1,098	1,316	0,957
	По долготе	0,736	5,175	0,620	1,890	0,821	2,243

Как и ожидалось, наилучшие результаты получены при совместном использовании GPS и ГЛОНАСС (среднеквадратическое отклонение σ не превышает 0,620 м). При столь малых

значениях σ дифференциальные поправки не дают снижения погрешности местоопределения. Эффект использования дифференциальных поправок заметен только для системы ГЛОНАСС (среднеквадратичная погрешность по каждой из координат снизилась почти вдвое).

На рис. 2 (а, в, д, ж, и, л) приведены результаты измерений координат приемником «ТРАНЗАС Т-701» в различных режимах (на каждом графике 3600 точек, снятых с интервалом 1 с). На осях графиков отложены отклонения от усредненной точки установки приемника ($56^{\circ} 19' \text{ с.ш.}$ и $44^{\circ} 00' \text{ в.д.}$) в долях минут.

Для проверки гипотезы о законе распределения случайных величин измерений на рис. 2 (б, г, е, з, к, м) показаны распределения относительных частот зафиксированных результатов измерений для различных режимов работы навигационного приемника.



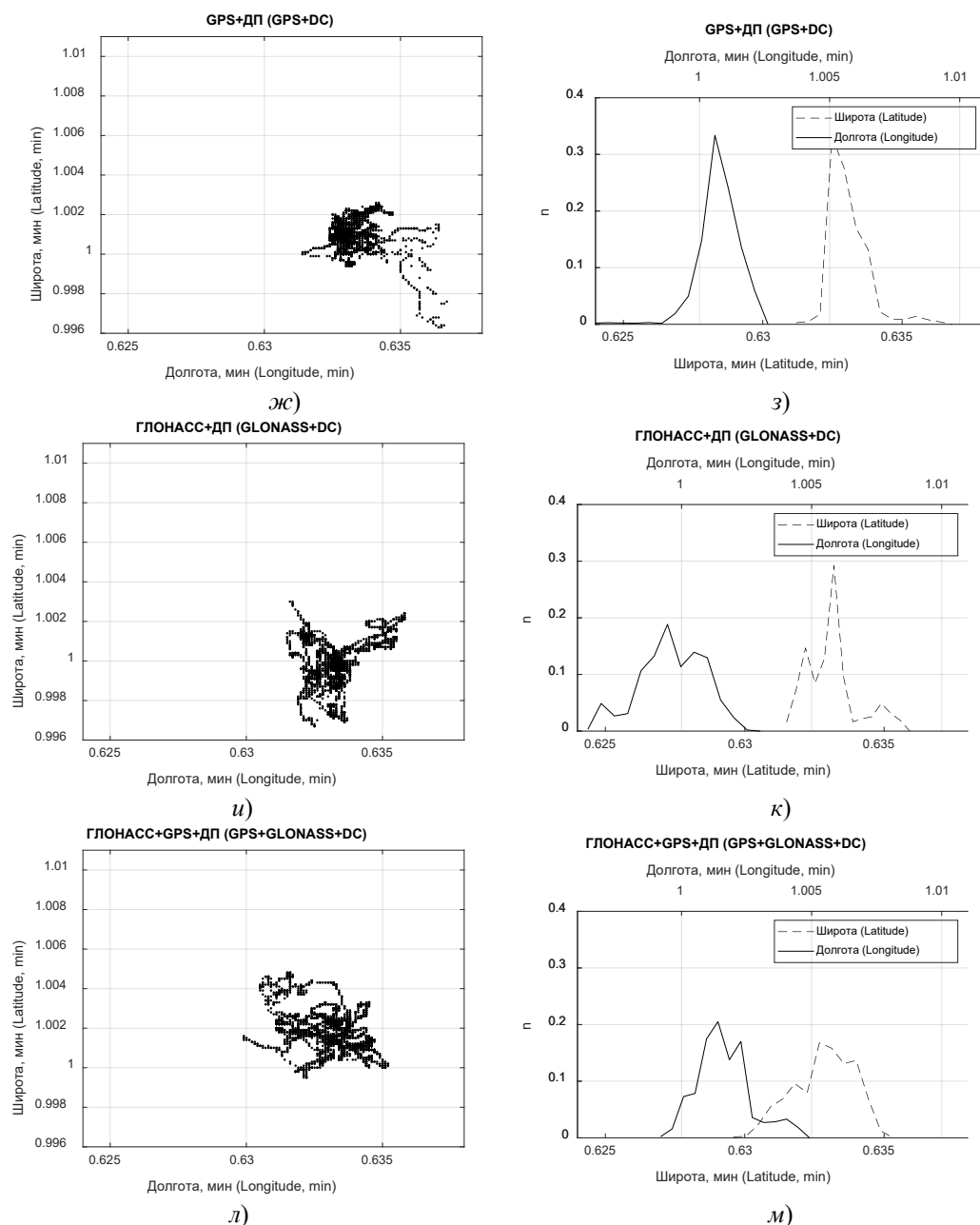


Рис. 2. Результаты измерения местоположения при работе приемника в различных режимах (а, в, д, ж, и, л) и интервальные распределения (б, г, е, з, к, м), вычисленные на основе измерений
Fig. 2. Location measurement results during receiver operation in various modes (a, в, д, ж, и, л) and interval distributions (б, г, е, з, к, м) calculated based on measurements

На графиках $n = n_i/n_0$ – нормированная относительная частота появления измеренной величины n_i в заданном интервале, $n_0 = 3600$ – объем выборки. Отклонения от усредненной точки установки приемника ($56^\circ 19'$ с.ш. и $44^\circ 00'$ в.д.) для широты и долготы на осях приведены в долях минут.

Вид кривых распределения, приведенных на рис. 2 (б, г, е, з, к, м), позволяет сделать вывод, что погрешности позиционирования навигационного приемника нельзя представить случайным процессом с гауссовским законом распределения, во всяком случае, на приведенной выборке в 3600 измерений в течении 1 часа.

Анализ характера погрешностей измерения координат с использованием ГНСС

На рис. 4 а, б представлены две произвольные выборки из 200 точек (с интервалом в 1 с) из 3600 результатов измерений, полученных в режиме GPS+ ГЛОНАСС+ ДП (см. рис. 2, ж).

Ошибка по долготе (ДР) меняется в пределах от -1 до 2,5 м, по широте (ШР) – в пределах -0,7 до 0,7 м.

На эти графики нанесены изменения широты (ШН) и долготы (ДН), полученные с использованием генератора случайных чисел (ГСЧ) с гауссовским законом распределения. Распределение измеренных величин отклонений в выборке из 3600 измерений в течении часа приближается к виду нормального распределения (рис. 5, *з*). Характеристики генератора случайных чисел и реальные данные, полученные при измерениях в режиме GPS+ ГЛОНАСС+ ДП, показаны на рис. 5 (среднее и среднеквадратичное отклонения генератора случайных чисел совпадает с соответствующими характеристиками массива данных, полученного в режиме GPS+ ГЛОНАСС+ ДП). Здесь отклонения по широте и долготе пересчитаны в метры.

В реальной выборке наблюдается сильная временная корреляция координат. В качестве иллюстрации на рис. 4, *в* представлены взаимокорреляционные функции трех 30-ти элементных выборок (номер 1, 2 и 3) по 30 с, сдвинутых относительно друг друга на 10 элементов (рис. 3), и исходной экспериментальной выборки из 3600 элементов, полученные при измерениях в режиме GPS+ГЛОНАСС+ДП (см. рис. 5 *а, б*).

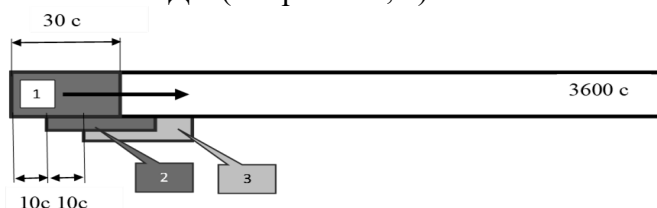


Рис. 3. Порядок вычисления взаимокорреляционных функций
Fig. 3. The order of calculation of the intercorrelation functions

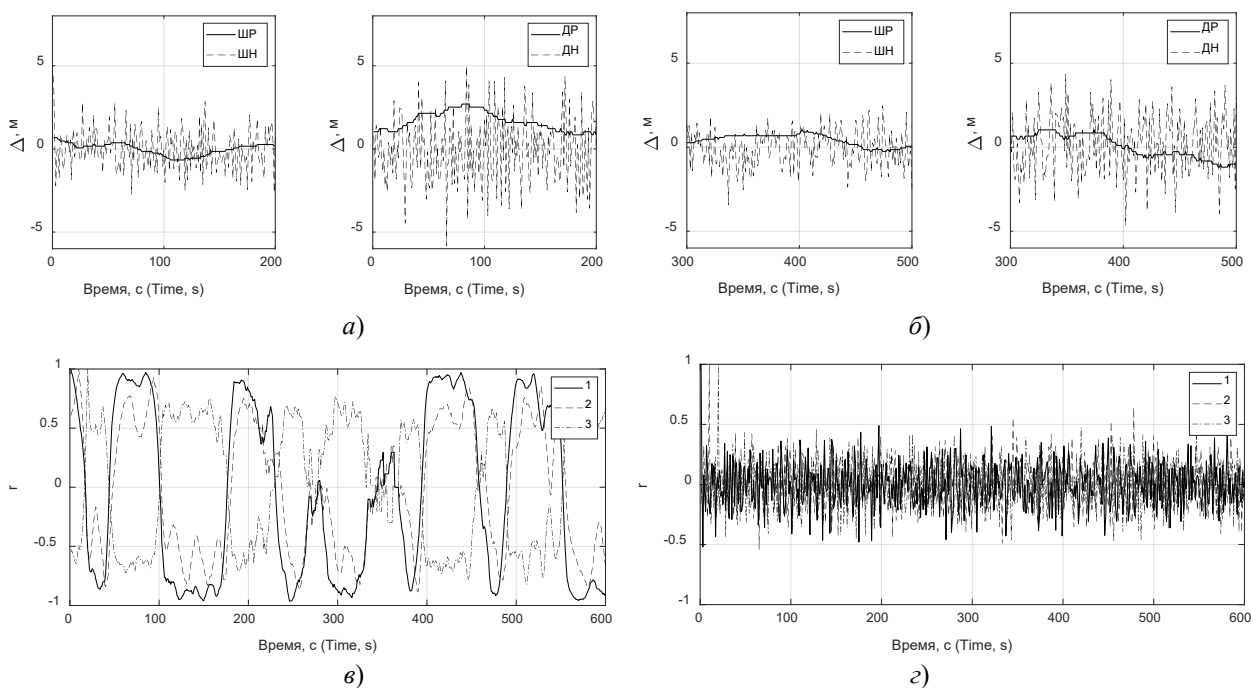


Рис. 4. Сравнение реальных зависимостей погрешностей местоопределения и теоретических зависимостей при гауссовском законе распределения измеренных величин

Fig. 4. Comparison of real dependences of location errors and theoretical dependences under the Gaussian distribution law of measured quantities

Как видно из рис. 4, *в*, коэффициент взаимной корреляции в основном превышает $\pm 0,4$ (сильная корреляция на малых интервалах времени, характерных для систем управления). На рис. 4, *з* показаны взаимокорреляционные функции трех 30-ти элементных выборок (номер 1, 2 и 3) по 30 с, сдвинутых относительно друг друга на 10 элементов, и выборки в 3600 элементов, полученной для генератора случайных чисел с гауссовским законом распределения. Коэффициент взаимной корреляции в этом случае не превышает $\pm 0,3$.

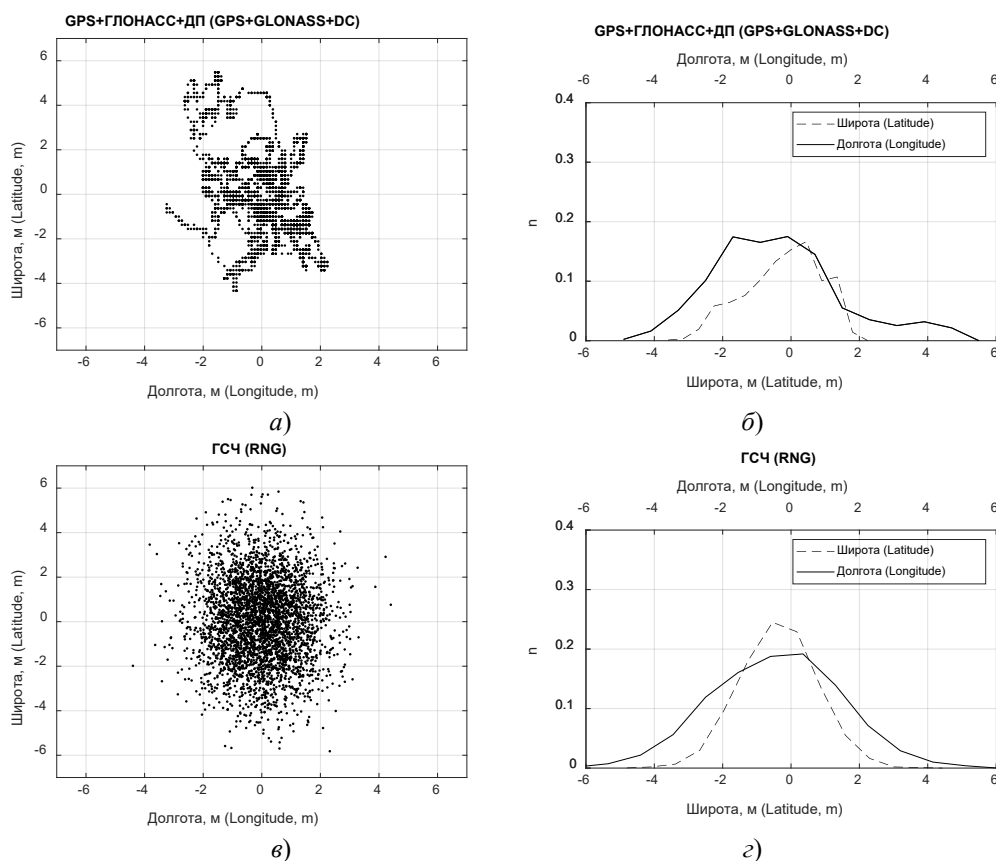


Рис. 5. Сравнительные характеристики ГСЧ и реальных результатов при приёме в режиме ГЛОНАСС+GPS+ДП

Fig. 5. Comparative characteristics of GPS and real results when receiving in GLONASS+GPS+DC mode

Таким образом, при моделировании динамики судна с учетом погрешностей измерения навигационных приборов некорректно представлять погрешности позиционирования навигационного приемника случайным процессом с гауссовским законом распределения.

Экспериментальные данные сняты для фиксированной географической точки. При движении судна координаты меняются и, строго говоря, в каждой новой точке траектории мы имеем свой закон распределения погрешностей определения местоположения. Однако, учитывая, что при решении задач управления рассматриваются весьма ограниченные перемещения судна (масштаб в пространстве десятки – сотни метров, масштаб во времени секунды – минуты), приемники ГНСС работают с одним созвездием спутников, при одинаковых параметрах тропосферы, ионосферы и других факторов, можно полагать, что распределения погрешностей определения местоположения будет одинаковы в разных точках траектории движения судна [7].

Далее, при моделировании влияния погрешностей навигационных приемников на динамику судна, будут использованы экспериментальные значения погрешностей датчика позиционирования, приведенные во втором разделе.

Влияние характера погрешностей местоопределения судна на динамику процесса управления

Для исследования влияния характера погрешности определения местоположения на динамику судна воспользуемся математической моделью инновационного колесного судна «Золотое кольцо», приведенную в [8]. В [9, 10] подробно исследованы динамические характеристики судна при реализации алгоритма удержания судна на заданной траектории при ветровом воздействии. Для формирования управляющих воздействий на гребные колеса используется вспомогательная функция [11]:

$$Rul = k_{\alpha} \cdot (\alpha - \alpha_z) + k_{\omega} \cdot \omega + k_{\gamma} \cdot (y - y_z),$$

где α , α_z – текущий и заданный угол курса; ω – угловая скорость судна; $(y - y_z)$ – отклонение от заданной траектории движения; k_{α} , k_{ω} , k_{γ} – коэффициенты пропорциональности.

Моделирование проводилось при следующих условиях:

- для измерения значений курса и угловой скорости используются идеальные датчики (погрешность измерения равна 0);
- судно движется по траектории, совпадающей с осью x с максимальной скоростью;
- боковой ветер (скорость 5 м/с) появляется при $t = 300$ с, при $t = 600$ с ветер исчезает.

Результаты работы алгоритма удержания судна на прямолинейной траектории (при использовании «идеальных» датчиков измерения курса и угловой скорости, $k_\alpha = 10$, $k_\omega = 40$, $k_\gamma = 0,16$) приведены на рис. 6 (здесь Δy – отклонение от заданной прямолинейной траектории).

Использование навигационного датчика с систематической составляющей погрешности в 0,5 и 1,0 м (такого же порядка погрешности получены при экспериментальных исследованиях, табл. 1) не приводит к неприемлемому снижению качественных показателей процесса управления (кривые 2 и 3 на рис. 6). Система управления является статической по отношению к возмущающему воздействию (т.е. при постоянном воздействии ошибка так же стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия). Траектория смещается на величину погрешности измерения отклонения Δy , при этом угол дрейфа составляет 1,5 градуса.

Результаты моделирования процесса удержания судна на заданной траектории при аппроксимации погрешностей позиционирования навигационного приемника случайным процессом с гауссовским законом распределения (см. рис. 5, в, з), представлены на рис. 7. При этом алгоритм управления не в состоянии обеспечить движение судна по заданной траектории. Для случая с гауссовским законом распределения легко реализовать алгоритм, обеспечивающий устойчивое движение судна с использованием текущего среднего значения отклонения на выборке определенной длины. В работе он не рассматривается, поскольку реальные навигационные датчики имеют другую картину распределения погрешностей позиционирования.

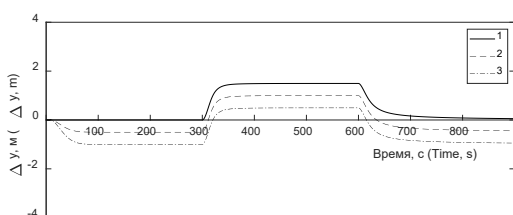


Рис. 6. Базовый вариант динамических характеристик судна
Fig. 6. The basic version of the dynamic characteristics of the vessel

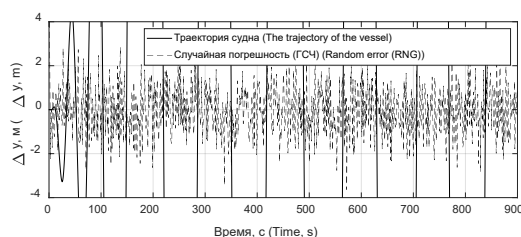


Рис. 7. Динамика судна при аппроксимации погрешности датчика случайным процессом с гауссовским распределением
Fig. 7. The dynamics of the vessel when approximating the error of the positioning sensor by a random process with a Gaussian distribution

На рис. 8 показаны результаты работы алгоритма удержания судна на заданной траектории при использовании для моделирования погрешности датчика позиционирования экспериментальных данных (см. рис. 5, а, б) без ветрового воздействия, на рис. 9 – при ветровом воздействии (с 300 по 600 секунду).

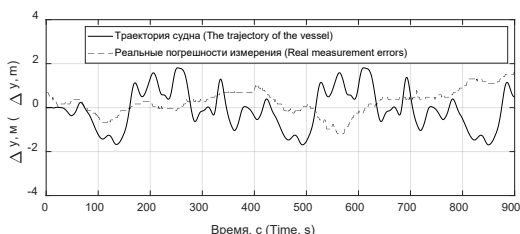


Рис. 8. Динамика судна без ветрового воздействия при использовании для моделирования погрешности датчика позиционирования экспериментальных данных
Fig. 8. The dynamics of the vessel without wind action when using experimental data to simulate the error of the positioning sensor

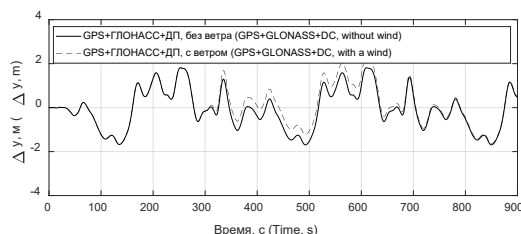


Рис. 9. Динамика судна при ветровом воздействии при использовании для моделирования погрешности датчика позиционирования экспериментальных данных
Fig. 9. The dynamics of the vessel under wind influence when using experimental data for modeling the error of the positioning sensor

В результате решения системы дифференциальных уравнений на каждом шаге получается набор параметров, характеризующих поведение судна: скорость (продольная и поперечная), частоты вращения гребных колес, курс судна и угол дрейфа, угловая скорость вращения относительно центра масс, пройденный путь и отклонение от траектории. Каждую секунду к вычисленному значению отклонения от траектории добавляется очередное, экспериментально полученное значение погрешности навигационного приемника (из массива на рис. 5, а). В одном массиве 3600 точек, для моделирования использовались произвольно вырезанные массивы из 900 точек. Как показали результаты моделирования, выбор массива в начале, середины или в конце исходной последовательности не меняет качественные показатели процесса управления. Такой же результат дают и выборки из других массивов (см. рис. 2).

Предложенный алгоритм обеспечивает удержание судна на заданной траектории с приемлемой точностью. Отклонения судна от заданной траектории не превышает ± 2 м, что вполне приемлемо для судна длиной 83 м (см. рис. 8). При появлении ветра (см. рис. 9) траектория смещается на величину, пропорциональную внешнему воздействию (статическая система управления). При этом характер изменения поперечной координаты определяется характером изменений погрешности навигационного прибора.

На рис. 10 приведены параметры процесса управления при изменении силы и направления ветра на 360° – скорость судна V , частоты вращения гребных колес n_1 и n_2 , угол дрейфа $\alpha_{др}$, отклонение от траектории Δy . Ось времени разбита на интервалы по 300 с, в каждом интервале меняются параметры внешнего воздействия. В качестве модели распределения погрешностей навигационного приемника использовалась экспериментальная зависимость (см. рис. 5, а).

Судно «Золотое кольцо» в силу своих конструктивных особенностей имеет сложную зависимость крутящего момента, вызванного ветровым воздействием, от направления ветра [9]. Алгоритм обеспечивает удержание судна на заданной траектории в пределах от 3,5 м до 4 м при изменении направления ветра на 360° и среднеквадратичной погрешности измерения местоположения порядка 1 м. Это приемлемые показатели для судна длиной 83 м и шириной 14 м.

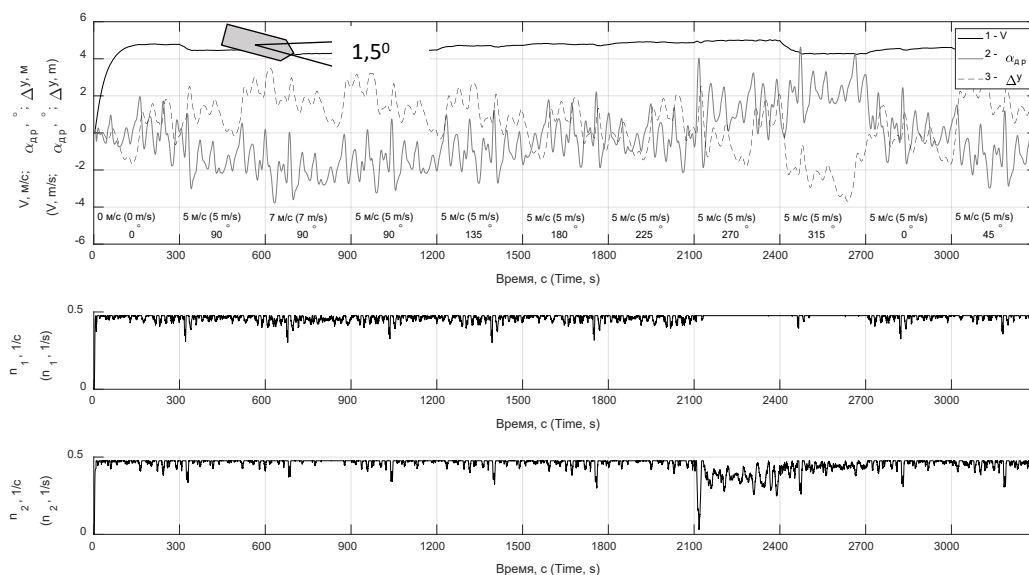


Рис. 10. Динамика судна при изменении скорости и направления ветра на 360° при использовании для моделирования погрешности датчика позиционирования экспериментальных данных
Fig. 10. The dynamics of the vessel when the wind speed and direction change by 360° when using experimental data for modeling the error of the positioning sensor

Заключение

При реализации сложных алгоритмов управления судном (удержание судна на заданной траектории, переход судна на заданную циркуляцию, расхождение судов и пр.) требуются датчики контроля местоположения судна. В качестве таковых могут использоваться приемники ГНСС.

При моделировании динамических процессов управления судном необходимо использовать адекватные модели характера поведения погрешностей позиционирования навигационных приемников.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что аппроксимировать погрешности позиционирования навигационного приемника случайным процессом с гауссовским законом распределения можно лишь на значительных интервалах времени (часы и более). На более коротких интервалах времени, характерных для функционирования судовых систем управления (секунды, минуты), модель нормального распределения результатов навигационных определений неприемлема. При моделировании работы алгоритмов управления судном целесообразно использовать экспериментальные зависимости погрешностей измерения местоположения.

Как показывают результаты исследования, возможно реализовать алгоритмы, обеспечивающие удержание судна на заданной траектории с приемлемой точностью. Отклонения от траектории, вызванные погрешностями измерения координат навигационными приборами, соизмеримы с величиной отклонений, определяемых конструктивными особенностями корпуса судна и его движителей.

Список источников:

1. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением / В.Ю. Каминский, Д.А. Скороходов и др. // Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. – 2019. – № 3. – Т. 3. – С. 64-70.
2. Стельмашук С.В. Работа рулевого привода в следящем и позиционном режиме // Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. – 2021. – № 2. – Т. 2. – С. 73-79.
3. Малов А.С., Плющаев В.И., Спицина Ю.В. Экспериментальная проверка возможности использования разнесенных спутниковых навигационных приемников для определения параметров движения судна // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2017. – № 50. – с. 56-61.
4. Скрыпник О.Н., Арефьев Р.А., Арефьева Н.Г. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 10/2. – с. 296-301.
5. Бадмаев А.Б., Козиенко Л.В., Климов Н.Н. Сравнительный анализ погрешностей определения координат одночастотными GPS / ГЛОНАСС приемниками в статическом режиме // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 212-220.
6. Вознесенский Д.А., Шахнов С.Ф. Анализ текущего состояния покрытия ВВП РФ сетью контрольно-корректирующих станций дифференциальной подсистемы ГНСС ГЛОНАСС/GPS // Транспортное дело России. – 2022. – № 3. – С. 136-138.
7. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.:Эко – Трендз, 2003. – 326 с.
8. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Математическая модель судна с колесным движительно – рулевым комплексом «Золотое кольцо» // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – 2018. – №3. – С. 36-46.

References:

1. Kaminsky VYu, Skorokhodov DA, et al. Prospects for Improving Marine Traffic Control Systems. Marine Intellectual Technologies. 2019;3(3):64-70.
2. Stelmashchuk S.V. Steering Drive Operation in the Tracking and Positioning Mode. Marine Intelligent Technologies. 2021;2(2):73-79.
3. Malov A.S., Plushaev V.I., Spitsina Yu.V. Experimental Verification of the Split Satellite Navigation Receivers Usage Possibility for Determining of the Ship Traffic Parameters. Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. 2017;50:56-61.
4. Skrypnik O.N., Arefiev R.A., Arefieva N.G. The Assessment of Positioning Error Characteristics of Combined Glonass/GPS Receivers. Modern High Technologies. 2019;10-2:296-301.
5. Badmaev A.B., Kozienko L.V., Klimov N.N. Comparative Analysis of Errors in Determining Coordinates with Single-Frequency GPS/GLONASS Receivers in Static Mode. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2019;62(2):212-220.
6. Voznesensky D.A., Shakhnov S.F. Analysis of the Current State of the Coverage of the Russian Federation Inland Waterways by a Network of Control and Correction Stations of the Differential Subsystem GNSS GLONASS/GPS. Transport Business of Russia. 2022;3:136-138.
7. Soloviev Yu.A. Satellite Navigation and Its Applications. Moscow: Eco-Trends; 2003.
8. Bychkov V.Ya., Grosheva L.S., Plushaev V.I. Mathematical Model of the Vessel with Wheeled Propulsion-Steering Complex “Golden Ring”. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2018;3:36-46.

9. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Динамика судна с колесным движительно-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий // Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. – 2019. – № 4 Т.2. – С.139-146.

10. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Анализ влияния погрешностей измерения параметров движения на качественные показатели процесса автоматического удержания судна с колесным движительно-рулевым комплексом на заданной траектории // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2017. № 51. – С. 46-55.

11. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Адаптивный алгоритм удержания судна с колесным движителем на курсе // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2015. – № 43. – С. 48-55.

9. Bychkov V.Ya., Grosheva L.S., Plushaev V.I. Dynamics of a Vessel with a Wheeled Propulsion-Steering Complex Under External Influences. Marine Intellectual Technologies. 2019;4(2):139-146.

10. Grosheva L.S., Plushaev V.I. Analysis of Movement Parameters Measurement Error Influence on the Quality Factors of the Automatic Hold Process of the Vessel with Wheel Propulsion and Steering System on a Specified Path. Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. 2017;51:46-55.

11. Grosheva L.S., Plushaev V.I. The Adaptive Algorithm of Keeping the Vessel with the Paddle Wheels on the Course. Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. 2015;43:48-55.

Информация об авторах:

Мельников Михаил Алексеевич

аспирант Волжского государственного университета водного транспорта, SPIN-код: 1999-1608, AuthorID: 1215292, ORCID iD: 0009-0006-4598-9934

Плющаев Валерий Иванович

профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой радиоэлектроники Волжского государственного университета водного транспорта, SPIN-код: 4523-6972, AuthorID: 9274, ORCID iD: 0000-0001-6120-3782

Information about the authors:

Melnikov Mikhail Alekseevich

graduate student of Volga State University of Water Transport, SPIN-code: 1999-1608, AuthorID: 1215292, ORCID iD: 0009-0006-4598-9934

Plyushchaev Valery Ivanovich

Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Radio Electronics" of Volga State University of Water Transport, SPIN-code: 4523-6972, AuthorID: 9274, ORCID iD: 0000-0001-6120-3782

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 25.04.2024.

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 15.04.2024; accepted for publication 25.04.2024.

Рецензент – Федяева Г.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Fedyaeva G.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.021

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-65-76

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ЭВРИСТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ

Владимир Иванович Аверченков¹, Анатолий Иванович Якимов^{2✉},
Екатерина Михайловна Борчик³, Евгений Анатольевич Якимов⁴,
Дмитрий Александрович Денисевич⁵

¹ Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

^{2, 3, 4, 5} Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

¹ aver@tu-bryansk.ru

² ykm@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-7878-2028>

³ katrinb15@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3571-7100>

⁴ e-soft@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0083-9653>

⁵ denis1351@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8473-6857>

Аннотация. Рассматривается производственный процесс выполнения заказов с параметрами, требующими переналадки оборудования. Задача определения оптимальной стратегии переналадки производственного оборудования является задачей оптимизации, которая сформулирована как задача коммивояжера. При решении такой задачи узлами графа являются заказы, дугами – переналадки с известной стоимостью при переходе от одного заказа к другому. Критерий оптимизации – минимальная общая стоимость переналадок оборудования. На основе матрицы стоимостей переналадок оборудования при выполнении заказов с известными параметрами проведены исследования решения задачи с помощью алгоритма локального поиска 2-орт и генетического алгоритма. Даны примеры оценки общей стоимости переналадок для заказов, имеющих несколько параметров с разными уровнями. Представлены шаги реализации эвристических алгоритмов для решения поставленной задачи, показаны результаты экспериментов.

Ключевые слова: промышленное предприятие, заказы с параметрами, переналадка оборудования, оптимизация, задача коммивояжера, полносвязный граф, алгоритм 2-орт, генетический алгоритм

Для цитирования: Аверченков В.И., Якимов А.И., Борчик Е.М., Якимов Е.А., Денисевич Д.А. Оптимизация последовательности выполнения заказов предприятия эвристическими алгоритмами // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 65-76. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-65-76.

Original article

Open Access Article

OPTIMIZING THE SEQUENCE OF ENTERPRISE ORDERS USING HEURISTIC ALGORITHMS

Vladimir I. Averchenkov¹, Anatoly I. Yakimov^{2✉}, Ekaterina M. Borchik³,
Evgeny A. Yakimov⁴, Dmitry A. Denisevich⁵

¹ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

^{2, 3, 4, 5} Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

¹ aver@tu-bryansk.ru

² ykm@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-7878-2028>

³ katrinb15@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3571-7100>

⁴ e-soft@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0083-9653>

⁵ denis1351@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8473-6857>

Abstract. The production process of fulfilling orders with parameters that require equipment readjustment is considered. The problem of determining the optimal strategy for the production equipment changeover is an optimization problem, which is formulated as a travelling salesman problem. When solving such a task, the graph nodes

are orders, the arcs are changeovers with a known cost when moving from one order to another. The optimization criterion is the minimum total cost of equipment changeovers. Based on the cost matrix of equipment changeovers when executing orders with the known parameters, research is carried out to solve the problem using the 2-opt local search algorithm and the genetic algorithm. Examples are given for estimating the total cost of changeovers for orders that have several parameters with different levels. The steps for implementing heuristic algorithms to solve the problem are presented, and the results of experiments are shown.

Keywords: industrial enterprise, orders with parameters, equipment changeover, optimization, travelling salesman's problem, fully connected graph, 2-opt algorithm, genetic algorithm

For citation: Averchenkov V.I., Yakimov A.I., Borchik E.M., Yakimov E.A., Denisevich D.A. Optimizing the Sequence of Enterprise Orders Using Heuristic Algorithms. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 65-76. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-65-76.

Введение

В статье рассматривается производственный процесс последовательного выполнения заказов, которые характеризуются множеством параметров. Такими параметрами заказа могут быть, например, цвет продукции, размеры, вес, форма и др. Для каждого параметра заказа предусматриваются уровни (например, для цвета – красный, белый, желтый, зеленый и др.) и определяются матрицы стоимостей переналадок производственного оборудования при переходе от одного уровня к другому.

Переналадка оборудования – это изменение настроек или компонентов производственного оборудования для переключения между производством разных типов продукции. Переналадка может включать в себя замену инструментов, установку новых программных настроек или комбинацию этих и других действий для подготовки оборудования к производству определенного изделия. При этом для переналадки оборудования требуются опытные работники – специалисты в области производства и управления производственными процессами, чтобы быстро и эффективно перенастроить машины.

Выходными параметрами производственного процесса являются, например, стоимость произведенной продукции; время, затраченное на ее производство, стоимость переналадок оборудования при выполнении заказов. При составлении плана выполнения значительного количества заказов возникает сложность планирования последовательности выполнения заказов с учетом требуемых переналадок оборудования. Переналадка оборудования регламентируется определенным временем, в течение которого заказы на определенных этапах не выполняются. Нерациональный порядок выполнения заказов на различных этапах производственного процесса может привести к повышению стоимости продукции из-за переналадок и/или долгосрочного выполнения на одном из этапов, что приведет к переносу сроков выполнения. Задача сокращения сроков выполнения заказов в производстве решается, например, путем разработки и использования автоматизированной системы планирования производства [1]. Эффект достигается за счет автоматизации выполнения трудоемких и рутинных операций по ведению оснастки.

Известно решение задачи для сокращения непроизводительных потерь времени в многономенклатурных производствах, связанных с необходимостью переналадок оборудования при смене ассортимента продукции [2]. Разработана модель производственной ситуации в виде комбинаторной задачи поиска простой цепи в полном ориентированном графе с нагруженными дугами. Предложен эвристический метод решения задачи, использующий ряд приемов, позволяющих существенно сократить объем перебора при поиске варианта очередности обработки небольшого количества различных видов продукции, приемлемого по критерию суммарной длительности переналадок.

Выполнены исследования по разработке инструментов для быстрой переналадки оборудования SMED (Single Minute Exchange of Dies). В SMED время, затрачиваемое на замену формы или штампа, должно составлять менее десяти минут. Это повышает производительность за счет сокращения времени, затраченного для переналадки производственного оборудования [3].

Важным направлением является исследование в теории производственных расписаний

задачи коммивояжера TSP (Travelling Salesman Problem), к которой сводится поиск оптимальной последовательности выполняемых заказов при их значительном количестве. Например, показано, что метаэвристика POPMUSIC (Partial OPTimization Metaheuristic Under Special Intensification Conditions) очень эффективна для решения различных сложных комбинаторных задач [4]. При этом разрабатываются эвристические приемы, позволяющие сократить выбор дуг исследуемого графа для получения лучшего решения за короткое время.

В задаче TSP с количеством узлов графа более тысячи используются современные методы машинного обучения [5]. Для сокращения временных затрат ограничивается пространство поиска при получении решения и, соответственно, снижается вычислительная нагрузка. Модель машинного обучения используется для выбора высоковероятных дуг при конструировании лучшего решения.

Масштабируемость алгоритмов решения проблемы коммивояжера (TSP) для обработки крупномасштабных задач является актуальной проблемой. Проведены исследования с миллионом узлов графа и ограничением времени вычислений до одного часа. Предложены алгоритмы, применяющие методы кластеризации узлов графа и использования генетического алгоритма для каждого кластера в отдельности на основе концепции «разделяй и властвуй» [6, 7]. Другим направлением сокращения времени построения лучшего решения для больших данных является применение облачных вычислений [8].

В представленной работе рассматривается задача определения оптимального порядка выполнения заказов, при котором минимизируется суммарная стоимость переналадок оборудования. Проблема формализуется в виде задачи коммивояжера с применением алгоритма локального поиска 2-opt и генетического алгоритма для большого количества заказов, имеющих несколько параметров с разными уровнями.

Материалы и модели

Пусть имеется мультимножество $Z_M = \{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{|Z_M|}\}$, $i = 1, 2, \dots, |Z_M|$ заказов с множеством $L = \{l_1, l_2, \dots, l_q, \dots, l_{|L|}\}$ параметров, требующих переналадки производственного оборудования, на котором заказы должны быть выполнены. Параметры $l_q \in L$, $q = 1, 2, \dots, |L|$ имеют множество дискретных значений $K^{l_q} = \{k_1^{l_q}, k_2^{l_q}, \dots, k_h^{l_q}, \dots, k_{|K^{l_q}|}^{l_q}\}$, $q = 1, 2, \dots, |L|$, которые будем именовать уровнями.

Каждый заказ требует определенной настройки оборудования, которая определяется разной стоимостью c_{ij} в зависимости от требуемой переналадки при переходе от заказа z_i к заказу z_j с другими уровнями параметров (рис. 1).

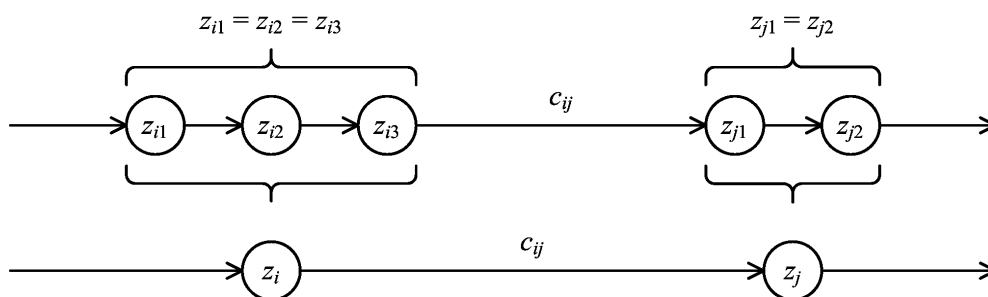


Рис. 1. Стоимость переналадки оборудования c_{ij} при переходе в процессе производства от заказа z_i к заказу z_j

Fig. 1. The cost of equipment c_{ij} changeover during the transition from order z_i to order z_j in the production process

Заказы с одинаковыми уровнями параметров $z_{i1} = z_{i2} = z_{i3}$ не требуют переналадки и объединены в один кластер Z_i . Аналогично заказы $z_{j1} = z_{j2}$ объединены в кластер Z_j (см. рис. 1). Таким образом, рассматривается множество Z , $|Z| < |Z_M|$ заказов с разными уровнями параметров.

Цель состоит в определении оптимальной последовательности выполнения заказов и переналадок оборудования, чтобы минимизировать стоимость настройки оборудования и общую стоимость выполнения множества заказов.

Задача определения оптимальной стратегии переналадки производственного оборудования является задачей оптимизации, которая может быть сформулирована как задача коммивояжера.

Математически задача определяется следующим образом: пусть имеется множество узлов графа, каждый из которых соответствует определенному заказу. Между узлами есть дуги, которые соответствуют переналадкам оборудования. Каждая переналадка оборудования имеет свою стоимость (может быть представлена временными параметрами). Требуется найти путь минимальной стоимости в этом графе, который будет соответствовать оптимальной последовательности выполнения заказов и переналадок оборудования.

Решение этой задачи может быть получено с использованием алгоритмов решения задачи коммивояжера, таких как жадный алгоритм, динамическое программирование, метод ветвей и границ, эволюционные алгоритмы и др. При этом необходимо учитывать все возможные варианты переналадок оборудования.

Для формализации производственного процесса введем обозначения матриц стоимостей переналадки параметров оборудования. В общем виде будет рассматриваться случай с $|L|$ параметрами, каждый из которых имеет $|K^{l_q}|$, $q=1, 2, \dots, |L|$ различных уровней. Например, в общем случае параметр l_1 имеет $|K^{l_1}|$ уровней, параметр l_2 имеет $|K^{l_2}|$ уровней и т. д. Матрица $|P_q|$ стоимостей переналадки для параметра l_q между уровнями в общем случае:

$$P_q = (p_{qij})_{|K^{l_q}| \times |K^{l_q}|},$$

$$p_{qij} \in R; p_{qij} \neq p_{qji}; p_{qij} = 0, i = j; q = 1, \dots, |L|, i, j = 1, \dots, |K^{l_q}|,$$

где $|L|$ – количество параметров, $|K^{l_q}|$ – количество уровней q -го параметра, $|L|, |K^{l_q}| \in N$, $p_{qij} \in R$ – стоимость переналадки для q -го параметра при переходе с уровня i на уровень j (например, стоимость перехода в крашении с белого на красный цвет отличается от стоимости перехода с красного цвета на белый, т. е. $p_{qij} \neq p_{qji}$).

В терминах задачи о коммивояжере будем рассматривать стоимость переналадки оборудования между выполняемыми заказами, как расстояние между заказами c_{ij} (см. рис. 1). Пусть имеется $|Z|$ заказов с параметрами:

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{|Z|} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1|L|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{|Z|1} & l_{|Z|2} & \dots & l_{|Z||L|} \end{pmatrix}.$$

Каждый заказ z_i характеризуется параметрами с соответствующими уровнями:

$$z_i = (l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{i|L|}), i = 1, \dots, |Z|.$$

Тогда матрица расстояний C между заказами принимает вид:

$$C = (c_{ij})_{|Z| \times |Z|}, c_{ij} \in R; c_{ij} = 0, i = j; i, j = 1, \dots, |Z|; |Z| \in N,$$

где $|Z|$ – количество заказов.

Стоимости переналадки оборудования c_{ij} при переходе в процессе производства от заказа z_i к заказу z_j могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$c_{ij} = \sum_{q=1}^{|L|} p_{qij}, i, j = 1, \dots, |Z|,$$

где p_{qij} – стоимость переналадки оборудования для q -ого параметра, $q = 1, 2, \dots, |L|$.

Пример. Пусть рассматривается случай с четырьмя параметрами ($|L| = 4$), каждый из которых имеет четыре уровня ($|K^{l_q}| = 4, q = 1, \dots, 4$). Матрица стоимостей переналадки оборудования между уровнями параметров имеет вид:

$$P_q = \begin{matrix} & k_1^{l_q} & k_2^{l_q} & k_3^{l_q} & k_4^{l_q} \\ \begin{matrix} k_1^{l_q} \\ k_2^{l_q} \\ k_3^{l_q} \\ k_4^{l_q} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & p_{i12} & p_{i13} & p_{i14} \\ p_{i21} & 0 & p_{i23} & p_{i24} \\ p_{i31} & p_{i32} & 0 & p_{i34} \\ p_{i41} & p_{i42} & p_{i43} & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}, q = 1, \dots, 4.$$

Матрицы стоимости переналадки между уровнями для каждого из параметров:

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 5 & 8 & 7 \\ 10 & 0 & 9 & 6 \\ 5 & 10 & 0 & 3 \\ 9 & 10 & 6 & 0 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} 0 & 9 & 9 & 1 \\ 5 & 0 & 1 & 4 \\ 2 & 5 & 0 & 2 \\ 3 & 7 & 7 & 0 \end{pmatrix}, P_3 = \begin{pmatrix} 0 & 7 & 3 & 6 \\ 10 & 0 & 10 & 2 \\ 5 & 6 & 0 & 8 \\ 5 & 8 & 3 & 0 \end{pmatrix}, P_4 = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 5 & 9 \\ 5 & 0 & 1 & 9 \\ 7 & 5 & 0 & 2 \\ 10 & 8 & 5 & 0 \end{pmatrix}.$$

Параметру l_1 соответствуют номера строк и столбцов матрицы P_1 , параметру l_2 соответствуют номера строк и столбцов матрицы P_2 и т. д.

Параметры четырех заказов с соответствующими уровнями представлены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица уровней параметров четырех заказов

Table 1

Matrix of parameter levels for four orders

Заказы	Уровень параметра l_1	Уровень параметра l_2	Уровень параметра l_3	Уровень параметра l_4
z_1	3	4	2	2
z_2	4	1	1	2
z_3	3	3	3	2
z_4	2	2	4	3

Требуется определить стоимость оптимальной последовательности выполнения заказов.

Решение. Найдем стоимость c_{12} переналадки между заказами z_1 и z_2 .

Шаг 1. В матрице P_1 находим значение $p_{134} = 3$ (см. табл. 1).

Шаг 2. В матрице P_2 находим значение $p_{241} = 3$ (см. табл. 1).

Шаг 3. В матрице P_3 находим значение $p_{321} = 10$ (см. табл. 1).

Шаг 4. В матрице P_4 находим значение $p_{422} = 0$ (см. табл. 1).

Шаг 5. Находим суммарное значение переналадок по всем параметрам:

$$c_{12} = p_{134} + p_{241} + p_{321} + p_{422} = 16.$$

Аналогично по шагам 1 – 5 найдем стоимость c_{21} переналадки между заказами z_2 и z_1 :

$$c_{21} = p_{143} + p_{214} + p_{312} + p_{422} = 6 + 1 + 7 + 0 = 14.$$

Повторяя шаги 1 – 5 заполняем матрицу расстояний C между заказами, по которой определим оптимальный порядок выполнения заказов, минимизирующий суммарную стоимость переналадок оборудования:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 16 & 17 & 20 \\ 14 & 0 & 18 & 25 \\ 13 & 10 & 0 & 24 \\ 26 & 21 & 18 & 0 \end{pmatrix}.$$

Минимальная стоимость C_Z последовательности выполнения заказов z_4, z_3, z_2, z_1 :

$$C_Z = C(z_4, z_3, z_2, z_1) = c_{43} + c_{32} + c_{21} = 42.$$

Для решения задачи определения оптимального порядка выполнения заказов z_i , $i = 1, \dots, |Z|$, при котором суммарная стоимость переналадок оборудования будет минимальной, предлагается применение алгоритма локального поиска 2-opt и генетического алгоритма. В качестве хромосом при решении данной задачи предлагается использовать вектора последовательностей заказов, характеризующих суммарными стоимостями переналадок оборудования.

Эксперименты и методы

Методы, которые обеспечивают нахождение оптимального решения задачи, называются точными методами. Алгоритм поиска оптимального решения заключается в том, чтобы перебрать все возможные варианты решений, оценить их результат согласно целевой функции и выбрать наилучшее. Однако очевидно, что такой поиск крайне неэффективен и неосуществим из-за огромного количества возможных вариантов решений. На практике требуются решение больших задач, следовательно, акцент смещается с цели поиска точно оптимальных решений на цель получения эвристически хороших решений за разумное время.

Эвристические алгоритмы – это вероятностные алгоритмы поиска, предназначенные для решения задачи практическим путем в тех случаях, при которых найти точное решение не удается.

Алгоритм локального поиска 2-opt. Алгоритм локального поиска 2-opt – алгоритм парного сравнения, является наиболее простым и в то же время эффективным среди алгоритмов, используемых при решении задачи коммивояжера [9]. При выполнении алгоритма исследуется заданная последовательность заказов, которая улучшается с помощью шагов реализации согласно критерию стоимостной оценки. При этом для рассматриваемой задачи последовательность заказов на предыдущих этапах не сохраняется, кроме значения общей стоимости переналадки оборудования.

2-opt алгоритм является простым и эффективным благодаря итерациям, направленным на уменьшение стоимости переналадок между двумя парами случайных заказов путем изменения (обмена) переходов между ними. Работа алгоритма продолжается, пока не будет достигнуто заданное количество итераций для обмена между парами заказов. Выбор двух переходов между заказами для последующих преобразований осуществляется в наборе между двумя случайными парами. Обмен переходов происходит только в том случае, если стоимость переналадки уменьшится в результате итерации.

Алгоритм поиска оптимального порядка выполнения заказов 2-opt реализуется следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Указать исходные данные для генерации начальной последовательности выполнения заказов: количество заказов, количество итераций для преобразования переходов, матрицу стоимостей переналадки оборудования для асимметричной задачи (т.к. стоимость переходов между парой заказов в одном направлении отличается в обратном).

Шаг 2. Сгенерировать последовательность выполнения заказов, например, (5, 6, 3, 1, 4, 2).

Шаг 3. Вычислить для указанной в шаге 2 последовательности стоимость переналадок оборудования между заказами $C_Z = C(5, 6, 3, 1, 4, 2) = 94$, согласно значениям, приведенным в табл. 1.

Шаг 4. Реализовать итерации на данном шаге:

4.1 Выбираем два перехода между заказами в текущей последовательности. Пусть это будут заказы (5, 6) и (1, 4).

4.2 Производим обмен переходов между заказами (5, 1) и (6, 4), образуя новую последовательность выполнения заказов (5, 1, 3, 6, 4, 2) (рис. 2).

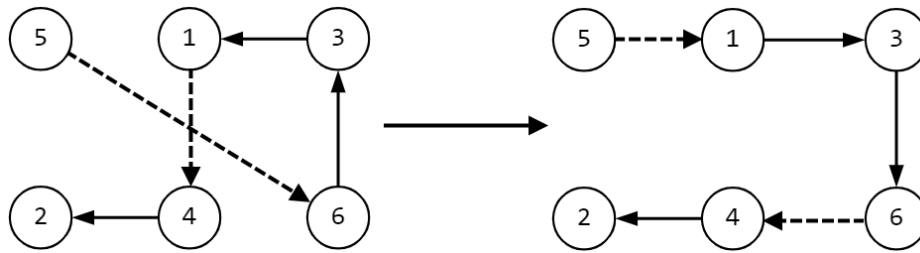


Рис. 2. Итерация алгоритма 2-opt
Fig. 2. Iteration of the 2-opt algorithm

4.3 Определяем стоимость последовательности выполнения заказов. Если полученная стоимость $C_Z = C(5, 1, 3, 6, 4, 2) = 91$ оказалась меньше предыдущей, то производим следующие итерации с новой последовательностью.

Шаг 5. Повторить шаг 4 столько раз, сколько задано количество итераций.

Шаг 6. Определить последнее решение в качестве наилучшего в работе алгоритма с наименьшим значением стоимости переналадки.

Генетический алгоритм. Генетический алгоритм широко используется для решения *NP*-полных задач в различных предметных областях, которые в свою очередь не могут быть решены алгоритмами перебора. Является перспективным алгоритмом для решения задачи коммивояжера [10]. Цель настоящего исследования – определить последовательность выполнения всех заказов, где общая сумма, которая определяется стоимостью переналадки оборудования между заказами, будет минимальной.

Чтобы применить генетический алгоритм для решения задачи оптимизации, необходимо установить, что является популяцией, хромосомой, геном, выбрать способ кодирования решений.

Популяция – это множество возможных решений поставленной задачи, образующее пространство поиска. В популяции представлены хромосомы – наборы параметров, определяющие предлагаемое возможное решение. Ген – один из параметров хромосомы. Скрещивание – операция, при которой хромосомы обмениваются генами. Мутация – случайная перестановка нескольких генов в хромосоме. Приспособленность – оценка хромосомы согласно целевой функции. Поколение – одна итерация алгоритма.

Для решения поставленной задачи хромосомой представляется множество заказов, указанные в последовательности их выполнения на оборудовании. Каждый ген хромосомы – это отдельный заказ, который не может повторяться дважды в одной хромосоме. Например, хромосому из шести заказов представим в виде (5, 1, 3, 6, 4, 2). Приспособленностью хромосомы будет являться стоимость переналадок оборудования при выполнении заказов.

Пусть, например, имеется шесть заказов. Матрица стоимостей переналадок оборудования при выполнении заказов представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица стоимостей переналадки оборудования

Table 2

Equipment reconfiguration cost matrix

№ заказа	1	2	3	4	5	6
1	0	10	22	33	24	19
2	5	0	12	10	3	29
3	11	10	0	24	19	16
4	12	21	18	0	18	3
5	15	19	7	15	26	15
6	36	15	14	17	0	9

Генетический алгоритм поиска оптимальной последовательности выполнения заказов реализуется следующими шагами.

Шаг 1. Установить параметры для поиска наилучшего решения: размер популяции, количество поколений, процент мутации.

Шаг 2. Сгенерировать начальную популяцию. В качестве первой хромосомы в популяции установим гены (заказы) в порядке возрастания их номера (1, 2, 3, 4, 5, 6). Генерируем следующие хромосомы в популяции, переставляя гены случайным образом, пока не достигнем необходимого размера популяции.

Шаг 3. Вычислить для каждой хромосомы в популяции, согласно значениям, приведенным в табл. 2, приспособленность (сумму стоимостей переналадок оборудования).

Шаг 4. Применить операцию скрещивания.

4.1 Выбрать случайным образом пару хромосом. Пусть парой выбранных хромосом являются $Ch1$: (5, 1, 3, 6, 4, 2) и $Ch2$: (2, 6, 1, 3, 5, 4) со значениями функции приспособленности 91 и 121 соответственно (рис. 3).

Хромосомы	Гены						Приспособленность
$Ch1$	5	1	3	6	4	2	91
$Ch2$	2	6	1	3	5	4	121
$Ch11$	5	1	3	4	6	2	79
$Ch22$	2	6	1	4	3	5	135

Рис. 3. Применение операции скрещивания
Fig. 3. Application of the crossing operation

4.2 Сгенерировать точку разрыва (выделена полужирно на рис. 3).

4.3 Часть генов $Ch1$ до точки разрыва, копируем в $Ch11$ (новую хромосому).

4.4 Часть генов $Ch2$ после точки разрыва, копируем в $Ch11$, если данные гены еще не были унаследованы.

4.5 Если не все гены $Ch11$ были заполнены, то выбираем не унаследованные гены $Ch1$;

4.6 Аналогичным образом формируем гены $Ch22$. Копируем часть генов $Ch2$ до точки разрыва, часть $Ch1$ после точки разрыва, заполняем не унаследованными генами $Ch2$.

Шаг 5. Применить операцию мутации. На данном шаге осуществляем обмен двух сгенерированных генов в случайной хромосоме. Интерпретация хромосом означает получение фенотипа из генотипа, т.е. определение порядка выполнения заказов (рис. 4).

Хромосома	Гены						Приспособленность
$Ch11$	5	3	1	6	4	2	69
Фенотип							

Рис. 4. Фенотип операции мутации
Fig. 4 The phenotype of the mutation operation

Шаг 6. Добавить полученные хромосомы-потомки ($Ch11$, $Ch22$) в популяцию, образовавшуюся после операции мутации на шаге 4.

Шаг 7. Сортировать все хромосомы в порядке возрастания значений функции приспособленности и удалить из популяции наименее приспособленные хромосомы в количестве, добавленном на шаге 6.

Шаг 8. Повторить шаги 3 – 7 в соответствии с заданным количеством поколений.

Шаг 9. Определить решение в качестве наилучшего в работе алгоритма, равное хромосоме с наименьшим значением приспособленности.

Результаты

На основании матриц P_1, \dots, P_4 стоимостей переналадки между уровнями для каждого из параметров, полученных в ходе постановки задачи (см. табл. 1), проведены исследования алгоритма локального поиска 2-opt и генетического алгоритма при различных начальных условиях (размер популяции, количество итераций (поколений)). Для генетического алгоритма принято решение об исследовании задачи управления порядком выполнения заказов с размером популяции, равным семидесяти хромосомам.

Итоговые результаты исследований представлены в табл. 3. В ходе экспериментов решались задачи тестирования программных продуктов, оценки погрешности полученной приспособленности, определения времени поиска решения.

Таблица 3

Результаты исследования эвристических алгоритмов

Table 3

Results of the study of the heuristic algorithms

Кол-во заказов, $ Z $	Генетический алгоритм			2-opt		
	Лучшее решение, C_z	Время поиска, T [с]	Количество поколений, K	Лучшее решение, C_z	Время поиска, T [с]	Количество итераций, K
4	42	0,33	100	42	1,57	100
10	60	0,89	1000	62	1,59	
20	78	80,25	100000	78	1,63	
30	100	88,39		99	1,80	
40	147	955,10	1000000	129	20,80	1000
50	169	1014,40		183	1128,20	10000
60	228	1113,20		225	1168,30	
70	286	1442,80		279	1253,40	
80	311	1467,10		307	1481,90	
90	353	1513,80		362	1896,70	
100	396	1357,70		386	2273,30	
120	441	2646,90		344	3087,60	
140	590	3258,40	356	6398,30		

В результате исследований экспериментальные данные позволяют провести анализ общей стоимости переналадок оборудования C_z выполнения заказов, времени (T , с) нахождения лучшего решения, приближенного к оптимальному, за количество итераций в алгоритме 2-opt и поколений K в генетическом алгоритме. Критерием для остановки алгоритма 2-opt (генетического алгоритма) является количество итераций (поколений) K .

Зависимость стоимости C_z переналадки оборудования от количества заказов согласно выполняемым алгоритмам представлена на рис. 5.

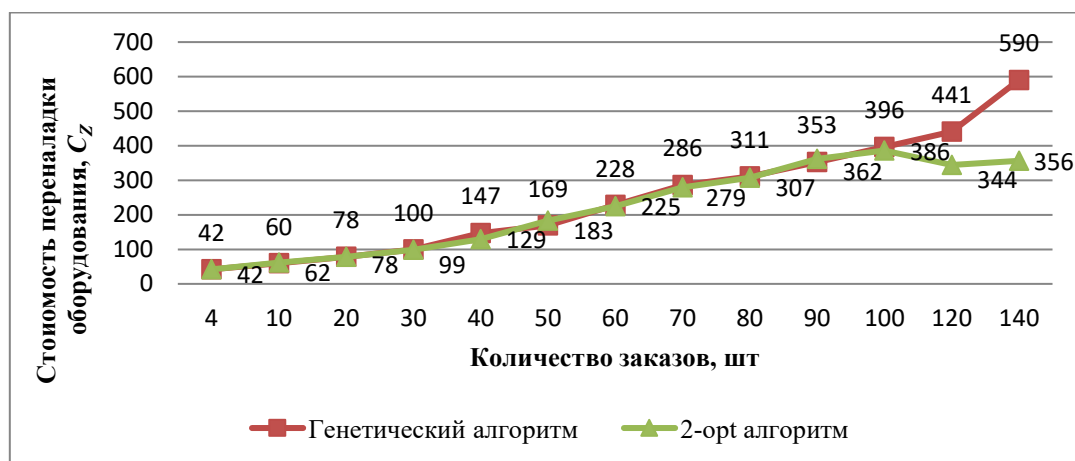


Рис. 5. Зависимость стоимости переналадки оборудования от количества заказов
 Fig. 5. Dependence of the cost of equipment changeover on the number of orders

В исследовании с количеством заказов $|Z| = 4$ решение получено методом полного перебора (число перестановок равно 24) с применением алгоритма 2-opt и генетического алгоритма. Результаты во всех случаях совпадают, абсолютная погрешность равна нулю. Алгоритмы находят оптимальное решение за короткое время, благодаря рациональному заданию количества итераций (поколений) $K = 100$.

В исследовании при $|Z| = 10$ метод полного перебора не применялся в связи с 3628800 вариантами для поиска оптимального значения. Так же с увеличением числа заказов $|Z|$ для поиска лучших решений необходимо увеличивать количество поколений, что в итоге приводит к увеличению вычислительных затрат и, соответственно, увеличению времени поиска лучшего решения.

Заключение

Полученные результаты работы генетического алгоритма и алгоритма локального поиска 2-opt при большом количестве заказов являются приближенными, не являются оптимальными. Однако полученные решения являются рациональными для практического применения.

Согласно данным экспериментов (см. табл. 3, рис. 5), алгоритм 2-opt в большинстве случаев показал стоимость переналадок лучше, чем генетический алгоритм, однако для поиска решений потребовалось больше времени.

С ростом масштабируемости задачи возникает необходимость увеличения итераций (поколений), что приводит к значительному времени работы алгоритмов (рис. 6).

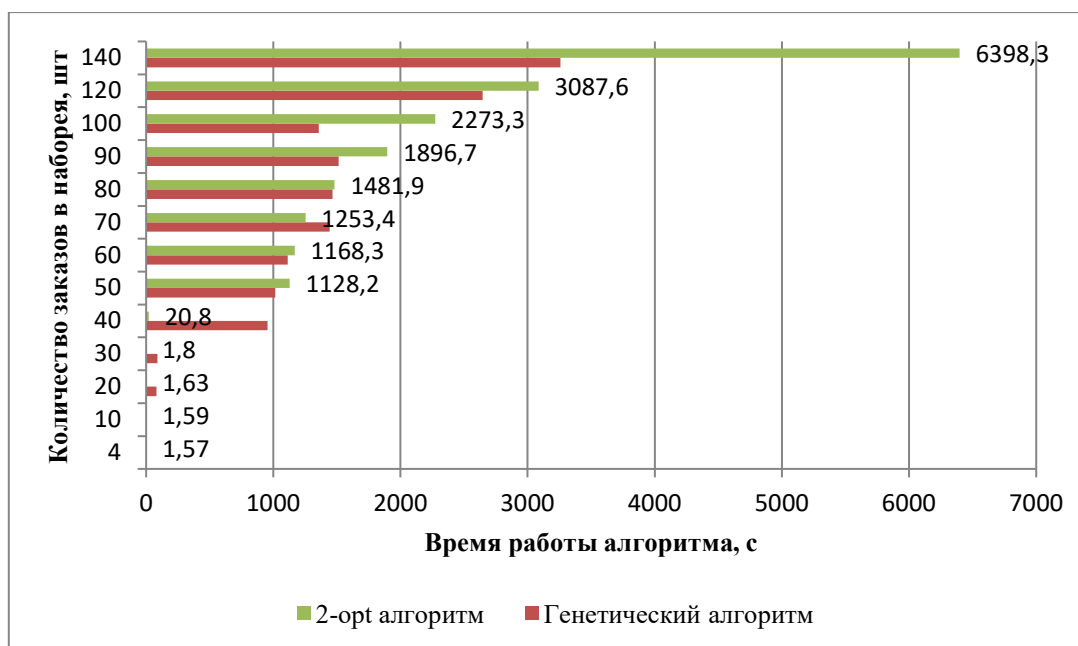


Рис. 6. Зависимость времени работы алгоритма от количества заказов
 Fig. 6. The dependence of the algorithm's operating time on the number of orders

Для получения количественных оценок эффективности алгоритмов используется непараметрический тест Мак-Немара (McNemar's test) [11]. При этом введены номинативные переменные: 1 – быть лучше и 0 – быть хуже по времени поиска решения. В соответствии с тестом Мак-Немара по данным табл. 3 построена матрица 2×2 , для которой на языке программирования R получено следующее решение:

```
> data<-matrix(c(0,9,3,2),2,2)
> data
[1,] [2,]
[1,] 0 3
[2,] 9 2
> mcnemar.test(data,correct=TRUE)
```

McNemar's Chi-squared test with continuity correction

data: data

McNemar's chi-squared = 2,0833, df = 1, p-value = 0,1489

Нулевая гипотеза для парных сопоставлений эвристических алгоритмов состоит в том, что доля алгоритмов, лучших по времени поиска решения, одинакова для количества заказов $|Z|$, равных 4, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140 (см. табл. 3). В соответствии с полученным решением $p\text{-value} = 0,1489$ на уровне значимости $\alpha = 0,05$ недостаточно оснований, чтобы отвергнуть нулевую гипотезу.

Практическая значимость исследований состоит в численных результатах применения алгоритма локального поиска 2-opt и генетического алгоритма для решения задачи управления последовательностью выполнения большого количества заказов при планировании производства.

При решении задачи планирования с количеством заказов 100 и более рекомендуется составлять уравнение Парето-оптимальности для определения оптимального решения в многокритериальной оптимизации, где необходимо удовлетворить несколько критериев одновременно (в данном случае C_Z – лучшее решение и T – время поиска) [9].

Список источников:

1. Терехов М.В., Заикин В.С., Аверченков А.В. Повышение эффективности производства на основе разработки автоматизированной системы планирования производства // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 2 (12). – С. 49-57.

2. Сошников А. В. Экспресс-метод сокращения потерь времени на переналадку оборудования при смене ассортимента продукции // Национальная ассоциация ученых. – 2020. – №1 (57). – С. 43-48.

3. Saravanana V., Nallusamyb S., Balajic K. Lead Time Reduction through Execution of Lean Tool for Productivity Enhancement in Small Scale Industries // International Journal of Engineering Research in Africa. 2017. No. 29. pp. 165-174.

4. Taillard, É.D., Helsgaun, K. POPMUSIC for the Travelling Salesman Problem // European Journal of Operational Research. 2019. No 2 (272). pp. 420-429.

5. Mele U.J., Gambardella L.M., Montemanni R.A. New Constructive Heuristic driven by Machine Learning for the Traveling Salesman Problem. A Preprint. 2021. 12 p.

6. Alhanjouri M.A. Proposed Algorithms to solve Big Data traveling salesman problem // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2018. Vol. 5. Issue 6. pp. 14-20.

7. Mariescu-Istodor R., Fränti P. Solving the Large-Scale TSP Problem in 1 h: Santa Claus Challenge 2020 // Frontiers in Robotics and AI. 2021. No 8. pp. 1-20.

8. Gawali M. B., Shinde S. K. Task scheduling and resource allocation in cloud computing using a heuristic approach // Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications. 2018. No 4. 16 p.

9. Avdoshin S.M., Beresneva E.N. The Metric Travelling Salesman Problem: The Experiment On Pareto-optimal Algorithms. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS. 2017. Vol. 29. No 4. pp. 123-138.

10. Курейчик В.М., Логунова Ю.А. Анализ перспективности применения генетического алгоритма при решении задачи коммивояжера // Информационные технологии. – 2018. – Т. 24. – № 11. – С. 691-697.

References:

1. Terekhov M.V., Zaikin V.S., Averchenkov A.V. Improving Production Efficiency Based on the Development of an Automated Production Planning System. Automation and Modeling in Design and Management. 2021;2(12):49-57.

2. Soshnikov A.V. Express Method for Reducing Time Lost on Equipment Changeovers When Changing Product Range. The National Association of Scientists. 2020;1(57):43-48.

3. Saravanana V., Nallusamyb S., Balajic K. Lead Time Reduction Through Execution of Lean Tool for Productivity Enhancement in Small Scale Industries. International Journal of Engineering Research in Africa. 2017;29:165-174.

4. Taillard É.D., Helsgaun K. POPMUSIC for the Travelling Salesman Problem. European Journal of Operational Research. 2019;2(272):420-429.

5. Mele U.J., Gambardella L.M., Montemanni R.A. New Constructive Heuristic Driven by Machine Learning for the Traveling Salesman Problem; 2021.

6. Alhanjouri M.A. Proposed Algorithms to Solve Big Data Traveling Salesman Problem. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2018;5(6):14-20.

7. Mariescu-Istodor R., Fränti P. Solving the Large-Scale TSP Problem in 1 h: Santa Claus Challenge 2020. Frontiers in Robotics and AI. 2021;8:1-20.

8. Gawali M.B., Shinde S.K. Task Scheduling and Resource Allocation in Cloud Computing Using a Heuristic Approach. Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications. 2018;4:16.

9. Avdoshin S.M., Beresneva E.N. The Metric Travelling Salesman Problem: The Experiment on Pareto-optimal Algorithms. TrudyISPRAN/Proc. ISPRAS. 2017;29(4):123-138.

10. Kureichik V.M., Logunova Yu.A. The Genetic Algorithm Application Prospects Analysis for the Traveling Salesman Problem Solution. Information Technologies. 2018;24(11):691-697.

11. Tinungki G.M. Implementation of McNemar's Test on the Cellular Operator Company in the Comparative Hypotheses Test for Two Correlated Samples // International Journal of Applied Engineering Research. 2018. Vol. 13. No 12. pp. 10651–10657.

11. Tinungki G.M. Implementation of McNemar's Test on the Cellular Operator Company in the Comparative Hypotheses Test for Two Correlated Samples. International Journal of Applied Engineering Research. 2018;13(12):10651-10657.

Информация об авторах:

Information about the authors:

Аверченков Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные технологии и системы» Брянского государственного технического университета, Заслуженный деятель науки РФ

Averchenkov Vladimir Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Computer Technologies and Systems" of Bryansk State Technical University, Honoured Scientist of the Russian Federation

Якимов Анатолий Иванович

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета, ORCID: 0000-0002-7878-2028

Yakimov Anatoly Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Automated Control Systems" of Belarusian-Russian University, ORCID: 0000-0002-7878-2028

Борчик Екатерина Михайловна

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета, ORCID: 0000-0003-3571-7100

Borchik Ekaterina Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department "Automated Control Systems" of Belarusian-Russian University, ORCID: 0000-0003-3571-7100

Якимов Евгений Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета, ORCID: 0000-0003-3571-7100

Yakimov Evgeny Anatolievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Automated Control Systems" of Belarusian-Russian University, ORCID: 0000-0003-3571-7100

Денисевич Дмитрий Александрович

старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета, ORCID: 0009-0007-8473-6857

Denisevich Dmitry Aleksandrovich

Senior Lecturer of the Department "Automated Control Systems" of Belarusian-Russian University, ORCID: 0009-0007-8473-6857

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

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

Статья поступила в редакцию 15.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 01.03.2024.

The article was submitted 11.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.03.2024.

Рецензент – Аверченков А.В., доктор технических наук, в.н.с., Институт конструкторско-технологической информатики РАН.

Reviewer – Averchenkov A.V., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute for Design-Technological Informatics RAS.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.562

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-77-83

КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ПОДБОРА СПЕЦИАЛИСТОВ В СОСТАВ ЭКСПЕРТНЫХ ГРУПП

Анна Геннадьевна Бушева^{1✉}, Александр Николаевич Феофанов²

^{1,2} «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Россия

¹ zub97@mail.ru

² feofanov.fan1@yandex.ru

Аннотация. Данное исследование посвящено одному из этапов разработки автоматизированной системы по подбору специалистов для предприятий машиностроительного сектора, а именно подготовительного этапа разработки приложения. На этапе подготовки разрабатываются основные схемы взаимодействия, описываются этапы функционирования системы и определяются инструменты, которые будут использоваться для дальнейшей реализации. Описаны компоненты, входящие в состав системы, которая позволяет автоматизировать отбор специалистов в состав экспертных групп, и их основные функции, условия применения, способы взаимодействия, графические схемы, а также преимущества и недостатки используемых инструментов. Подробное описание и анализ взаимодействий компонентов предоставляет возможность для дальнейшего написания кода программы и разработки интерфейса приложения. Даны подробные описания терминов, используемых для описания работы программы. Графические схемы дают возможность наглядно продемонстрировать применение компонентов и результат работы. Также описываются преимущества и недостатки применения WSGI-серверов. Указаны основные типы производств на машиностроительных предприятиях. Приведены аргументы, указывающие на необходимость разработки программного обеспечения, автоматизирующего процесс выбора кандидата на предприятиях машиностроения. Задачей является разработка автоматизированной системы подбора специалистов. Методы исследования – анализ, наблюдение. Статья содержит в себе разработки и схемы, описание которых поможет создать код, для дальнейшего функционирования программы. Разработана принципиальная схема функционирования программы, а также описана последовательность процессов, необходимая для запуска приложения. Статья является одним из этапов разработки веб-приложения, который подтверждает возможность создания такого продукта.

Ключевые слова: эксперты, автоматизированная система, анализ данных, автоматизация, экспертные группы

Для цитирования: Бушева А.Г., Феофанов А.Н. Компоненты системы подбора специалистов в состав экспертных групп // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 77-83. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-77-83.

Original article

Open Access Article

COMPONENTS OF THE SYSTEM FOR SELECTING SPECIALISTS FOR EXPERT GROUPS

Anna G. Busheva ^{1✉}, Alexander N. Feofanov²

^{1,2} Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

¹ zub97@mail.ru

² feofanov.fan1@yandex.ru

Abstract. This study is devoted to one of the stages of developing an automated system for selecting specialists for enterprises in the mechanical engineering sector, namely to the preparatory stage of the application development. At the preparation stage, basic interaction schemes are worked out, the stages of system operation are described, and the tools that will be used for further implementation are determined. The paper describes the components included in the system, which allows one to automate selecting specialists into expert groups, and identifying their main functions, conditions of use, methods of interaction, graphical diagrams, as well as the advantages and disadvantages of the tools applied. A detailed description and analysis of component interactions provide opportunities for further coding of the program and designing the application interface. Detailed descriptions of the terms used to depict the program opera-

tion are given. Graphic diagrams make it possible to clearly demonstrate the use of components and the result of the work. The advantages and disadvantages of applying WSGI servers are also stated. The main types of production at machine-building enterprises are shown. Arguments are given that indicate the need to develop software that automates the process of selecting a candidate at machine-building enterprises. The paper objective is to develop an automated system for selecting specialists. The research methods are analysis, observation. The article contains developments and diagrams, the description of which will help to write code to continued operation of the program. A schematic diagram of the program operation is built, and the sequence of processes required to launch the application is described. The article is one of the stages of developing a web application, which confirms the possibility of creating such a product.

Keywords: experts, automated system, data analysis, automation, expert groups

For citation: Busheva A.G., Feofanov A.N. Components of the System for Selecting Specialists for Expert Groups. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 77-83. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-77-83.

Введение

Машиностроительные предприятия, вне зависимости от типа производства (единичное, серийное, массовое) имеют сложную структуру. Для обеспечения бесперебойного функционирования предприятия необходимо обеспечить соблюдение следующих условий:

- соблюдение законов и подзаконных актов страны, в которой располагается предприятие;
- наличие материально-технической базы (помещение, оборудование (в том числе и сменное), склады, хозяйственный инвентарь, рабочие и энергетические машины и т.д.);
- производство востребованного продукта для его дальнейшей реализации и выпускаемой прибыли;
- обеспечение качества выпускаемого продукта;
- наличие квалифицированных сотрудников (в том числе и приглашенных экспертов) [1].

Специалисты, работающие на предприятии – это главная его ценность. Без грамотных технологов, инженеров, руководства, экспертов невозможно будет обеспечить развитие и эффективное функционирование. Подбором кандидатов занимаются сотрудники отдела кадров и руководство отделений [2]. Хорошо развитое машиностроение позволяет производить более качественные товары, а также выполнять нестандартные заказы поставщиков. Это трудоемкий процесс, при котором может возникнуть ряд следующих затруднений:

- специалисты отдела кадров могут иметь недостаточно квалификации для оценки кандидата, привлекаемого для решения нестандартной задачи. Как правило, чтобы оценить узкопрофильных специалистов необходимо иметь профильное образование или достаточный опыт в смежной сфере;
- руководитель и/или специалист отдела имеют ограниченный временной ресурс, автоматизированная система поможет сократить время на подбор специалиста;
- коррупционная составляющая. Согласно Федеральному закону от 25.12.2008 N 273-ФЗ (ред. от 19.12.2023) «О противодействии коррупции» существует следующее определение слова «коррупция». Это злоупотребление служебным положением, дача взятки, получение взятки, злоупотребление полномочиями, коммерческий подкуп, либо иное незаконное использование физическим лицом своего должностного положения вопреки законным интересам общества и государства в целях получения выгоды в виде денег, ценностей, иного имущества или услуг имущественного характера, иных имущественных прав для себя или для третьих лиц, либо незаконное предоставление такой выгоды указанному лицу другими физическими лицами.

Некоторые руководители и/или сотрудники отдела кадров могут использовать своё служебное положение и приглашать экспертов вне зависимости от их качеств и навыков, а опираясь на личные предпочтения с целью получения выгоды. Автоматизированная система позволяет избежать таких ситуаций и оценивать кандидатов исключительно исходя из их профессиональных качеств.

Автоматизация процесса подбора специалистов может помочь решить вышеперечисленные проблемы.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для полного понимания функционирования программы опишем её работу на высоком уровне. Работа программы представлена на рис. 1.

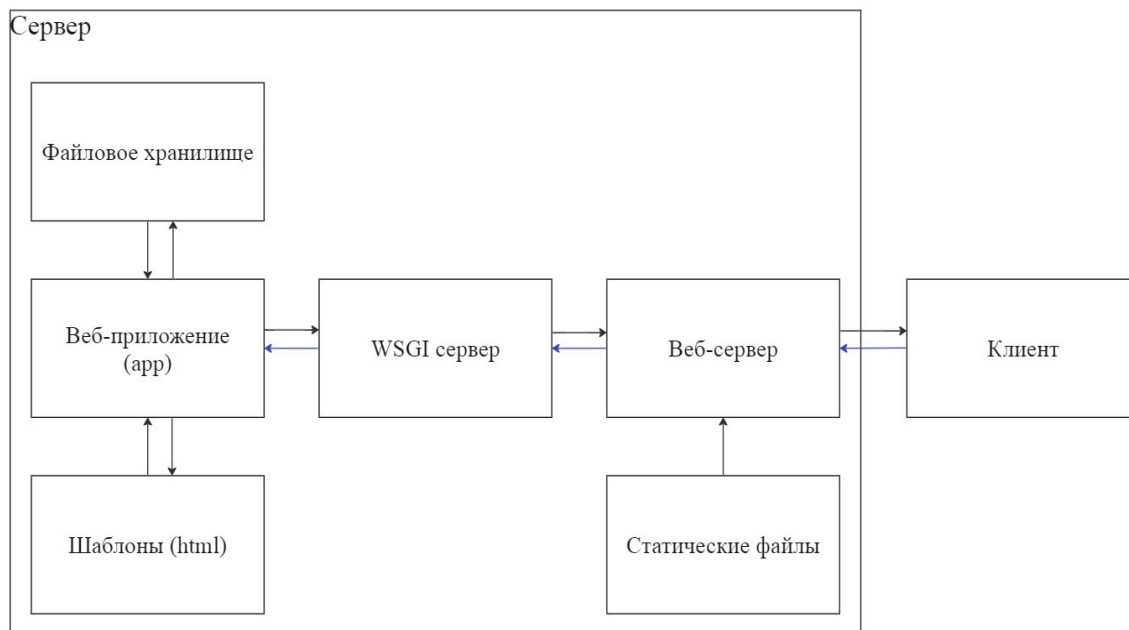


Рис. 1. Принципиальная схема функционирования программы
Fig. 1. Principal scheme of the program functioning

Для начала автоматизированного подбора кандидатов нужно выполнить два условия:

- присутствие пользователя, который сможет запустить программу и внести необходимые, для решения его задачи, критерии;
- наличие корректно оформленного шаблона о кандидатах в формате .xlsx. Шаблон и инструкция для формирования базы данных находятся внутри программы.

Пользователь посредством клиента обращается к приложению (в нашем случае клиент – это браузер, т.к. разрабатывается веб-приложение). Клиент, по протоколу HTTP (вариант передачи информации между двумя компьютерами, формат текстового сообщения), с переданным ему IP-адресом запрашивает необходимую веб-страницу. Данный запрос, попадая на сервер, будет перехвачен нашим приложением, которое вернет запрашиваемую информацию. Как правило такая информация представлена в виде HTML страницы.

Система расположена к масштабируемости и даже число пользователей не будет влиять на эффективность и скорость расчета, но для этого необходимо использовать специальное программное обеспечение, которое принимает запросы по протоколу HTTP. В нашем случае это NGINX. Это веб-сервер с открытым исходным кодом, который позволяет осуществлять работу в режиме высокой нагрузки и большого числа пользователей.

Для того, чтобы у пользователя была возможность увидеть начальную страницу и провести подбор экспертов интерпретатору необходимо выполнить ряд обязательных действий. Последовательность которых представлена на рис. 2.

Разрабатываемое программное обеспечение использует структуризатор, возможность применения которого возникает благодаря использованию ключевого слова `import` (англ. `import` – импортирование, извлечение). Импорт функций, классов и модулей в Python необходим для того, чтобы у разработчика появилась возможность использовать код, из открытых источников, ссылаясь на названия его классов, функций, модулей и переменных. Этот подход упрощает код и делает его более понятным. Кроме того, использование импорта позволяет избежать конфликтов имен, потому что Python будет искать нужные функции и классы только в импортированных модулях.



Рис. 2. Последовательность процессов, необходимая для запуска приложения
Fig. 2. The sequence of processes required to launch the application

На данном этапе предполагается, что код проекта будет состоять из трех частей: веб-приложение, алгоритм подбора и перечень констант. В части веб-приложения импортируется FastAPI и описывается бизнес-логика. В алгоритме подбора реализована методика первичной обработки и оптимизации данных методом Парето-доминирования. Перечень констант будет задействован в обеих предыдущих частях с целью исключения дублирования собственного кода и уменьшения размера программы.

В коде алгоритма подбора будет описана главная функция, непосредственно применяющая алгоритм. Эта функция будет импортирована в код веб-приложения и вызвана каждый раз, когда пользователь нажмет кнопку «рассчитать».

При расчетах возникает необходимость пользоваться константами и во избежание их повсеместного использования создаются переменные, которые на уровне оперативной памяти компьютера являются «ячейками». В дальнейшем для подстановки значения переменной достаточно написать её название.

Логгирование (от англ. logging – ведение журнала) – это процесс записи информации о работе программы в стандартное устройство вывода или текстовый файл (лог). В логах обычно записываются ошибки, предупреждения и сообщения информационного уровня. Формат лога может быть любой, но, как правило, в него включают временную метку, содержащую дату и время, уровень сообщения (ошибка, предупреждение и инфо), источник сообщения (строка кода, которая сделала эту запись) и текст сообщения. Данная информация может быть полезной при диагностике и устранении проблем, которые могут возникнуть у пользователей в режиме реального времени.

Чтение кода на этапе интерпретации происходит сверху вниз построчно. Когда интерпретатору на строке попадает ключевое слово `def` (от англ. Define – определить), то он определяет слово, идущее после `def` как название функции, запоминает его, после чего пропускает тело функции и двигается построчно далее. То же самое происходит и с классами.

WSGI сервер – это интерфейс, обеспечивающий взаимодействие между python-кодом и веб-сервером. WSGI сервер имеет ряд следующих преимуществ:

1) универсальность – WSGI является стандартом для взаимодействия между веб-сервером и приложением, что позволяет использовать его с любыми веб-серверами, поддерживающими этот стандарт;

2) производительность – WSGI позволяет оптимизировать производительность приложения, так как он может обрабатывать множество запросов одновременно;

3) масштабируемость – WSGI серверы могут быть легко масштабированы для обработки большего количества запросов;

4) совместимость – WSGI совместим с различными языками программирования, что позволяет создавать приложения на разных языках и использовать их совместно;

5) безопасность – WSGI обеспечивает безопасность приложений, так как позволяет изолировать приложения друг от друга и ограничивать доступ к ресурсам.

Также WSGI серверы имеют следующие недостатки:

1) сложность настройки – настройка WSGI может быть сложной для начинающих разработчиков, так как требует понимания работы сервисов в операционных системах семейства Linux;

2) ограниченная поддержка – не все веб-серверы поддерживают WSGI, что может ограничить выбор сервера для разработки приложения.

Несмотря на это использование данного протокола, является необходимым для функционирования проекта на удаленном сервере и его взаимодействия с веб-сервером.

После выполнения всех вышеперечисленных шагов происходит запуск приложения.

Результаты

Написание программы, как правило состоит из нескольких этапов, они представлены на рис. 3.

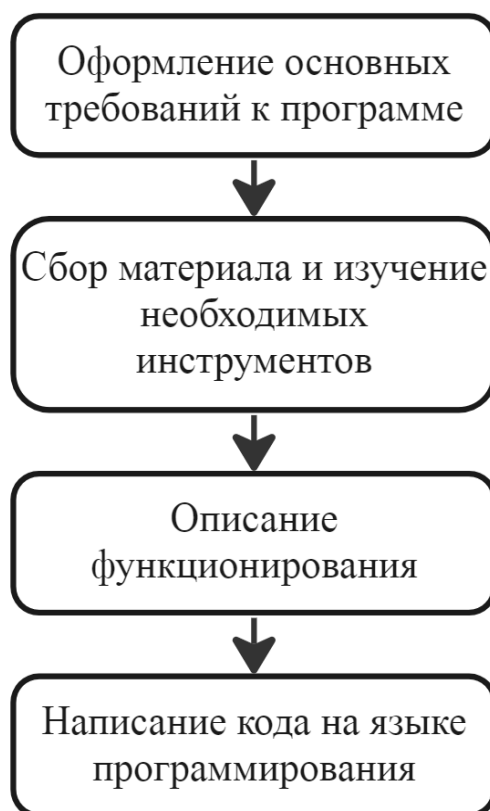


Рис. 3. Этапы разработки программы

Fig. 3. Stages of program development

В данной статье описан третий этап, то есть описание функционирования. Это один из наиболее трудоемких этапов, т.к. именно в процессе описания нужно учесть ошибки, которые могут возникнуть при функционировании.

Система обеспечивает обработку и анализ данных. Метод оценивания компетенции студентов имеет много общего с методом оценки экспертов. Например, так же учитывается уровень образования и отрасль деятельности.

Заключение

Привлечение экспертов для решения различных задач всегда применялось на машиностроительных производствах. Именно благодаря привлечению сторонних специалистов возможно развитие, вовлечение инновационных технологий и проведение независимого анализа технологических, экономических и иных процессов.

Благодаря описанию всех вышеперечисленных процессов, связанных с программой для подбора экспертов, будет возможна дальнейшая реализация веб-приложения. В качестве основной особенности данной системы можно отметить применение экспертно-статистического и человеко-машинного подхода, что позволяет минимизировать ошибки при выборе эксперта (двойной контроль).

Структура системы обеспечивает высокую эффективность решения производственных задач, т.к. основывается на анализе большого количества данных.

Список источников:

1. Женжебир В.Н. Современное состояние и особенности размещения общего машиностроения в РФ // Научные основы современного прогресса: сб. ст. международной научно-практической конференции, Екатеринбург, – 2016. – Т.1. – С. 92-98.

2. Феофанов А.Н., Бушева А.Г. Основы формирования способа отбора специалистов в состав экспертных групп: монография. – М: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», – 2022. – 82 с.

3. Феофанов А.Н., Бушева А.Г. Разработка алгоритма автоматизированной системы выбора эксперта для проведения корректировочных мероприятий по улучшению характеристик сверлильного кондуктора // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 1(11). – С. 52-60.

4. Азгальдов Г.Г., Костин А.В. Метрология и квалиметрия: вопросы идентификации // Мир измерений. – 2010. – № 1. – С. 4-7.

5. Архитектура аналитической системы оценки образовательных программ групп / Б.В. Бойцов, Г.С. Жетесова и др. // Качество и жизнь. – 2018. – № 2. – С. 24-28.

6. Стребков Д.О. Познавательные возможности онлайн-опросов в российской исследовательской практике (на примере опроса Интернет-фрилансеров) // Социология: методология, методы, математическое моделирование. – 2010. – № 31. – С. 135-161.

7. Бушева А. Г., Феофанов А.Н. Отбор участников в состав экспертных групп с помощью метода многокритериальной оптимизации // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – № 3(58). – С. 22-27.

8. Феофанов А.Н., Бушева А. Г. Программная реализация алгоритма подбора экспертов // Технология машиностроения. – 2021. – № 8. – С. 48-53.

9. Dalkey N.C. The Delphi Method: An experimental study of group opinion. – Rand Corporation, 1969. – С. 79.

10. Finding the top conferences using novel ranking algorithm. International Journal of Advanced and Applied Sciences / M. Farooq, H.U. Khan et al.// International Journal of Advanced and Applied Sciences – 2017. – № 4(6). – С 148-152.

References:

1. Zhenzhebir VN. Current State and Location Features of General Mechanical Engineering in the Russian Federation. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Scientific Foundations of Modern Progress; Yekaterinburg: 2016, vol. 1. p. 92-98.

2. Feofanov A.N., Busheva A.G. Fundamentals of Developing a Method for Selecting Specialists in Expert Groups. Moscow: Janus-K; 2022.

3. Feofanov A.N., Busheva A.G. Development of an Algorithm for an Automated System for Selecting an Expert for Corrective Measures to Improve the Characteristics of the Drilling Jig. Automation and Simulation in Design and Control. 2021;1(11):52-60.

4. Azgaldov G.G., Kostin A.V. Metrology and Qualimetry: Issues of Identification. Measurements World. 2010;1: 4-7.

5. Boytsov BV, Zhetesova GS, et al. The Architecture of the Analytical System for Evaluating Educational Programs of Groups. Quality and Life. 2018;2:24-28.

6. Strebkov D.O. Cognitive Capabilities of Online Surveys in Russian Research Practice (the Case of Survey of Internet Freelancers). Sociology 4M. 2010;31:135-161.

7. Busheva A.G., Feofanov A.N. Selection of Participants of Expert Groups Using the Method of Multicriteria Optimization. Vestnik MSTU “Stankin”. 2021;3(58): 22-27.

8. Feofanov A.N., Busheva A.G. Software Implementation of the Algorithm for Selecting Experts. Mechanical Engineering. 2021;8:48-53.

9. Dalkey N.C. The Delphi Method: An Experimental Study of Group Opinion. Rand Corporation; 1969. p. 79.

10. Farooq M, Khan HU, et al. Finding the Top Conferences Using Novel Ranking Algorithm. International Journal of Advanced and Applied Sciences. 2017;4(6):148-152.

11. Maybury M.T. Expert finding systems. Technical Report MTR06B000040 // MITRE Corporation. – 2006. – С. 64.

12. Earl M. Knowledge management strategies: Toward a taxonomy // Journal of Management Information Systems. – 2001. – № 18 (1). – С. 215-233

Библиографический список:

1. Ветрова Т.А. Применение методов многокритериальной оптимизации в задачах выбора оптимального перевозчика // Инновационные технологии в машиностроении, образовании и экономике. – 2019. – Т. 24. – № 3(13). – С. 113-116

2. Демидов Д.Г., Костакова Е.С. Требования к современным пользовательским интерфейсам // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2016. – № 1. – С. 25-26.

3. Сидельников Ю.В. Формирование понятийно-терминологического аппарата экспертологии // Проблемы управления. – 2017. – № 5. – С. 18–30.

4. Федеральный закон от 25.12.2008 N 273-ФЗ "О противодействии коррупции" (ред. от 19.12.2023 N 605-ФЗ).

Информация об авторах:

Бушева Анна Геннадьевна
аспирант МГТУ «СТАНКИН»

Феофанов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор кафедры инженерная графика МГТУ «СТАНКИН», вице-президент академии проблем качества, отделение «Квалиметрия» «МГТУ «СТАНКИН»

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

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

Статья поступила в редакцию 01.04.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 07.05.2024.

The article was submitted 11.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 07.05.2024.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

11. Maybury M.T. Expert Finding Systems. Technical Report MTR06B000040. MITRE Corporation; 2006. p. 64.

12. Earl M. Knowledge Management Strategies: Toward a Taxonomy. Journal of Management Information Systems. 2001;18(1):215-233.

Bibliographic list:

1. Vetrova T.A. Application of the Methods of Multicriteria Optimization in Problems of Choosing an Optimal Carrier. Innovative Technologies in Machine-Building, Education and the Economy. 2019;24-3(13):113-116.

2. Demidov D.G., Kostakova E.S. Requirements for Modern User Interface. Vestnik MGUP imeni Ivana Fedorova. 2016;1:25-26.

3. Sidelnikov Yu.V. Forming the Conceptual and Terminological Apparatus of the Expertology. Problemy Upravleniya. 2017;5:18-30.

4. On Combating Corruption. Federal Law, no. N 273-FZ. 2008 Dec 25. Amended, no. N 605-FZ. 2023 Dec 19.

Information about the authors:

Busheva Anna Gennadievna
graduate student of Moscow State University of Technology «STANKIN»

Feofanov Alexander Nikolayevich
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Engineering Graphics” of Moscow State University of Technology «STANKIN», Vice-President of the Academy of Quality Problems, Department «Qualimetry» of Moscow State University of Technology «STANKIN»

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.942

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-84-92

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫРУЧКИ БЫСТРОРАСТУЩЕЙ КОМПАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

Олег Иванович Дранко^{1✉}, Карина Кареновна Тароян²

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

¹ olegdranko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4664-1335>

² taroyan.kk@phystech.edu, <http://orcid.org/0009-0000-9662-2100>

Аннотация. Цель исследования: оценить потенциал роста быстрорастущих компаний, создать предпосылки для прогнозирования роста таких компаний. Задачей является выявление и прогнозирование точек роста экономики страны, который в целом основывается на росте отдельных хозяйственных субъектов – организаций. Методы исследования: рассматривается метод прогнозирования выручки как основного показателя быстрорастущих компаний (БРК). В качестве приближения рассматривается логистическая кривая (кривая Ферхюльста), параметры которой идентифицируются методом наименьших квадратов. В качестве источника используются открытые данные финансовой отчетности организаций. В данной работе используется критерий выявления быстрорастущих компаний – среднегодовой рост не менее 50 % в текущих ценах. Новизна работы: предложено исследование быстрорастущих организаций с помощью логистической кривой (сигмоиды). Идентифицированы параметры приближения. Сделана оценка роста (прогноз) по организациям на перспективу 2040 г. Установлена статистическая достоверность выбранного приближения для 714 крупных и средних быстрорастущих компаний из выборки. Результаты исследования: выявлена выборка около 900 быстрорастущих компаний России с помощью методов обработки больших массивов данных из 2,5 млн. организаций. Иллюстрирующие расчеты проведены на основании фактических данных выборки с более детальным выделением примера Вайлด์берриз. Сделана оценка возможностей роста рассматриваемых организаций. Проведено исследование применимости предложенного метода с помощью статистических критериев. Выводы: исследование роста быстрорастущих организаций на средний и более период с помощью логистической кривой выглядит предпочтительнее, чем экспонентой. Для подавляющего большинства таких организаций приближение логистической кривой является статистически значимым.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, рост, быстрорастущие организации, логистическая кривая, data mining

Для цитирования: Дранко О.И., Тароян К.К. Прогнозирование выручки быстрорастущей компании с использованием логистической кривой // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 84-92. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-84-92.

Original article

Open Access Article

FORECASTING THE REVENUE OF A FAST-GROWING COMPANY USING A LOGISTIC CURVE

Oleg I. Dranko^{1✉}, Karina K. Taroyan²

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

¹ olegdranko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4664-1335>

² taroyan.kk@phystech.edu, <http://orcid.org/0009-0000-9662-2100>

Abstract. The aim of the study is to assess the advancement potential of fast-growing companies, to create prerequisites for predicting the gain of such companies. The objective is to identify and forecast the growth points of the

country's economy, which is generally based on the advancement of individual economic entities, namely organizations. The research method for forecasting revenue as the main indicator of fast-growing companies (FGC) is considered. As an approximation, a logistic curve (the Ferhulst curve) is examined, the parameters of which are identified by the least squares method. Open data from financial statements of organizations are applied as a source. This work uses the criterion for distinguishing fast-growing companies; the average annual growth is of at least 50% at current prices. The novelty of the work lies in studying fast-growing organizations using a logistic curve (sigmoid). Approximation parameters are identified. A growth assessment (forecast) for organizations for 2040 is made. The statistical reliability of the selected approximation is established for 714 large and medium-sized fast-growing companies from the sample. The research results state, that a sample of about 900 fast-growing Russian companies is identified using the methods for processing large data sets from 2.5 million organizations. The illustrative calculations are based on actual sample data, highlighting the example of Wildberries in more detail. An assessment of the growth opportunities of the organizations under consideration is made. Studying the applicability of the proposed method using statistical criteria is carried out. The findings show that studying fast-growing organizations' advancement for a medium or longer period using a logistic curve looks more preferable than applying an exponential one. For the vast majority of such organizations, the approximation of the logistic curve is statistically significant.

Keywords: modelling, forecasting, growth, fast-growing organizations, logistic curve, data mining

For citation: Dranko O.I., Taroyan K.K. Forecasting the Revenue of a Fast-Growing Company Using a Logistic Curve. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 2 (24). pp. 84-92. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-84-92.

Введение

В современном мире для принятия управленческих решений компаниям необходим тщательный и комплексный анализ. Используя методы моделирования и прогнозирования [1, 2], компании могут сформировать правдоподобные сценарии своего будущего. Некоторые предыдущие исследования изучали эффективность ряда российских организаций [3, 4].

Большинство методов аппроксимации данных по организациям не учитывают предел роста компании, ряд других ограничений. Между тем, логистическая кривая имеет такой предел [5, 6], из-за чего она представляется наиболее подходящей в задаче прогнозирования с ограничением сверху.

При прогнозировании развития организаций интересно рассмотреть быстрорастущие компании (БРК). Эти организации оказывают положительное влияние на экономические показатели страны. Быстрорастущие компании обладают способностью быстро приспосабливаться к изменяющимся рыночным условиям и обрабатывать запросы потребителей, а также принимать стратегические решения в короткие сроки. Таким образом, конкурентоспособность таких организаций достаточно высока.

Одним из ключевых аспектов БРК является их относительно короткий срок жизнедеятельности. Соответственно, при анализе результата прогнозирования для этих организаций необходимо учитывать статистическую особенность.

В данной работе критерием определения БРК является среднегодовой рост выручки не менее 50 % за последние 5 лет.

Обзор

Быстрорастущие компании, также известные как «газели», обладают высокой скоростью роста и адаптивностью к изменяющимся рыночным условиям, аналогично одноименному млекопитающему из подсемейства антилоп, развивающему высокую скорость при беге. Термин «газели» был впервые использован в экономической сфере американским экономистом Джоном Берчем и с тех пор широко используется для описания таких организаций [7].

Эксперт по ценообразованию Г. Симон считает, что выявлять и изучать необходимо «скрытых чемпионов» быстрого роста, являющихся относительно небольшими и часто неизвестными компаниями и в то же время играющими ключевую роль в экономике страны или даже мира. В частности, в работах [8 – 10] это малые и средние предприятия, которые играют значительную роль в немецкой экономике. Он утверждает, что многие крупные и известные компании используют методы таких организаций, которые чаще всего основываются на обеспечении повышения ценности выпускаемой продукции: например,

сознательно ограничивают выпуск товаров, считая, что рост объемов снижает их исключительность, а значит и ценность.

Быстрорастущие компании в качестве объекта анализа в России рассмотрены в трудах [11 – 16] – каждый имеет свою особенность. Например, в работе [12] Ю.Г. Кириллов, И.А. Коновалов и Э.К. Енза выявляют БРК в рамках одного региона и рассматривают их вклад в валовый региональный продукт.

Математическая модель

Основанием для создания логистической кривой послужило утверждение Роя Чепмена из области математической биологии, что рост популяции зависит от двух факторов: биотического потенциала, т.е. потенциальной скорости роста популяции в идеальных условиях, и сопротивления среды, т.е. различных факторов, которые могут ограничивать рост популяции, например, нехватка пищи или присутствие хищников. Кривая показывает, как количество особей в популяции изменяется со временем при различных значениях параметров модели. Она используется для описания процессов с ограничениями. Кривая применима к анализу развития быстрорастущих компаний и рынка в целом [7].

Логистическая кривая была названа в честь бельгийского математика Пьера-Франсуа Ферхюльста, который предложил ее математический вид в 1838 году [3, 17].

Рассмотрим уравнение кривой Ферхюльста:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\delta * Q * K - Q^2}{K}, \quad (1)$$

где Q – количество особей популяции; K – предельное значение особей при определенных условиях; δ – потенциальная скорость размножения; t – время.

Проведя манипуляции над (1), получаем:

$$\frac{Q}{K - Q} = C * e^{\delta t}.$$

Рассмотрим наиболее известный вид логистической кривой:

$$F(t) = \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}}, \quad (2)$$

где $F(t)$ – функция, зависящая от времени; t_0 – год перегиба; k – параметр, определяющий скорость роста; L – предел роста.

Идентификация параметров L , k , t_0 по критерию минимизации корня среднеквадратичного отклонения выглядит следующим образом:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_0^{t_N} \left(Y_t - \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \right)^2}{(N+1)}} L, k, t_0 \min, \quad (3)$$

$$t_0^{\min} \leq t_0 \leq t_0^{\max}, \quad (4)$$

$$Y_N \leq L. \quad (5)$$

где D – корень среднеквадратичного отклонения; Y – значение выручки; k – параметр роста; t – индекс времени; t_0 – точка перегиба; t_N – последний период фактических данных; $t = 0$ – начальный период фактических данных.

Можно выделить три фазы в динамике этой кривой [3, 18]:

- начальная фаза медленного роста, который в некоторой степени напоминает экспоненциальный рост;
- фаза быстрого роста, которая имеет сходство с линейным ростом;
- заключительная фаза замедления, когда рост близок к гиперболическому – стремится к своему пределу.

Можно провести аналогию вышеописанных фаз с утверждением Роя Чепмена из математической биологии (рис. 1): кривая также имеет предел, к которому стремится при увеличении времени [19].

Для проведения экстраполяции необходимо идентифицировать параметры логистической кривой. Это можно сделать, используя метод наименьших квадратов (МНК), в котором параметры кривой выбираются так, чтобы минимизировалась сумма квадратов разностей исходных и оценочных значений.

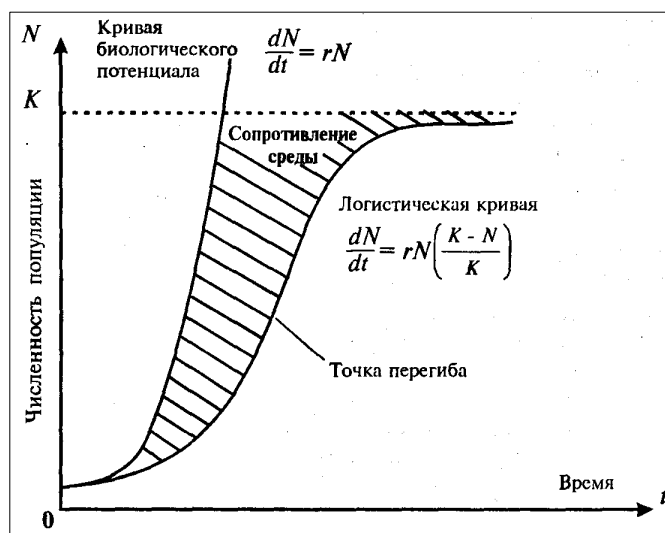


Рис. 1. График уравнения Ферхюльста на примере численности популяции
 Fig. 1. Graph of the Verhulst equation using population size as an example

Исходные данные

За статистическую основу были взяты данные российских компаний из открытых источников: Росстат [20] с 2014 по 2018 годы и сервис Государственного информационного ресурса бухгалтерской (финансовой) отчетности (БФО) ФНС России [21] с 2019 по 2022 гг. На момент подготовки работы данные за 2023 г. начали поступать, но пока в начальном объеме. Общее количество обработанных финансовых отчетов составило около 2,5 млн. российских компаний, среди которых приблизительно 0,8 млн. компаний имели нулевую выручку. Нужно отметить, что в условиях действующих санкций сбор данных ограничен рядом факторов.

Были выявлены компании, значение выручки которых составило более 1 млрд руб. – около 48 тыс. компаний из различных отраслей. Из данного набора выделено около 900 БРК с данными за 2014 – 2022 гг.

Результаты численного моделирования

Более подробно прогнозирование рассмотрено на БРК «Вайлдберриз» (ИНН 7721546864) – всем известный маркетплейс Wildberries. Данными является выручка компании с 2016 по 2022 гг. (табл. 1, рис. 2). Отметим, что финансовая отчетность организации включает только «свою» выручку. В маркетинговых исследованиях используется «оборот» организации с учетом выручки агентов компании. Следует отметить, что расчеты для Вайлдберриз проводились до большого пожара на складе под Санкт-Петербургом 13 января 2023 г. По нашим экспертным оценкам это происшествие повлияет на затраты, но не на выручку (модельный параметр) организации.

Для расчетов принято для (4) $t^{\min} = 2016$, $t^{\max} = 2045$.

Таблица 1

Выручка Вайлдберриз – фактическая и оценочная

Table 1

Wildberries revenue – actual and estimated

Год	Факт. выручка, млн. руб.	Оценка выручки, млн. руб.	Отношение оценки и фактической выручки
2016	37 601	37 690	1,002
2017	47 470	54 262	1,143
2018	69 509	77 978	1,122
2019	116 946	111 766	0,956
2020	169 773	159 599	0,940
2021	224 940	226 709	1,008
2022	317 212	319 690	1,008

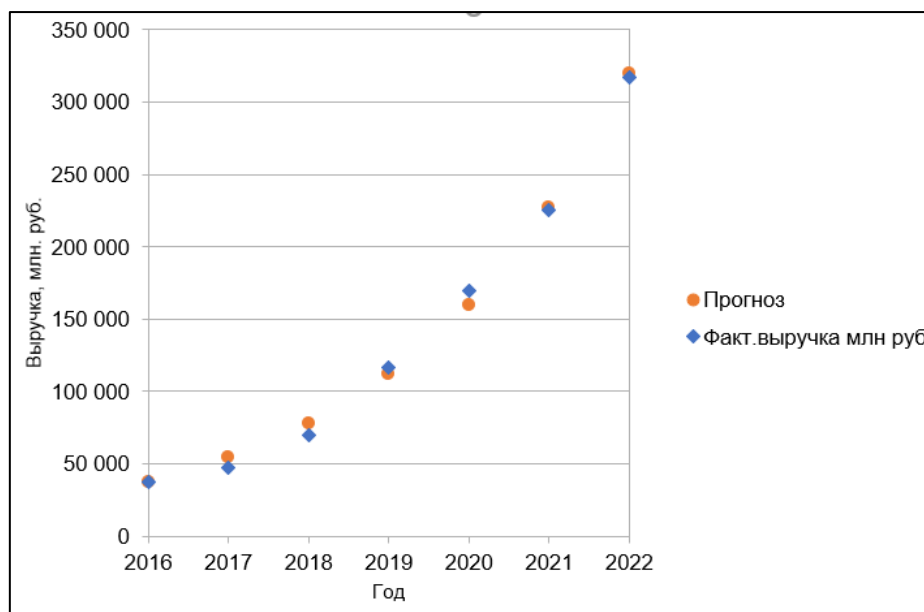


Рис. 2. Аппроксимация выручки Вайлдберриз по логистической кривой
Fig. 2. Approximation of Wildberries revenue using a logistic curve

В результате идентификации параметров по формуле (3) для исходных данных «Вайлдберриз» предел роста оценен $L \approx 4$ трлн. руб., темп роста $k \approx 37\%$, год перегиба $t_0 \approx 2028$ г.

На рис. 3 показана фактическая выручка за 2016 – 2022 гг., оценка и экстраполяция по формуле (2) выручки до насыщения (в расчете до 2045 года). По модельной оценке, в 2040 году выручка организации начинает стремиться к предельному значению.

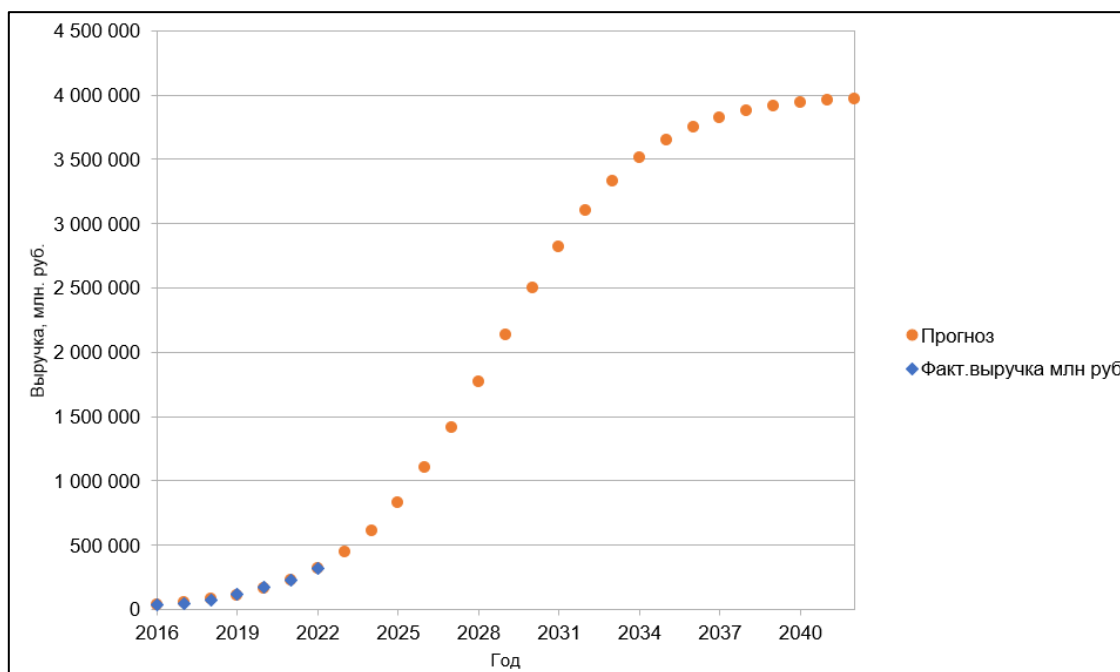


Рис. 3. Прогноз выручки Вайлдберриз до 2045 года
Fig. 3. Wildberries revenue forecast until 2045

Аналогично проведена идентификация параметров логистического приближения для выборки выявленных быстрорастущих компаний. Результаты расчета для некоторых организаций приведены в табл. 2.

Некоторые быстрорастущие организации России

Table 2

Some fast growing organizations in Russia

Наименование организации	Выручка за 2014 г., млрд руб.	Выручка за 2022 г., млрд руб.	Среднегодовой рост выручки 2014 – 2022, %	Потенциал L , млрд руб.	Рост k , %	Перегиб t_0 , год	Коэф. детерминации, R^2	Критерий Фишера, F	Параметр P
Алгоритм топливный интегратор	3,842	288,7	71,6 %	2 099	107,4 %	2023,7	0,9846	384	0,185
Альбион-2002	7,665	236,4	53,5 %	497	38,3 %	2022,4	0,9906	631	0,413
Эльгауголь	1,261	162,8	83,6 %	239	125,4 %	2021,4	0,9738	223	0,231
Газэнергосеть Санкт-Петербург	0,064	155,9	164,8 %	232	53,4 %	2020,0	0,9532	122	0,464
Ситилинк	3,819	137,4	56,5 %	220	45,7 %	2020,0	0,9517	118	0,528
Мирогрупп ресурсы	2,811	105,6	57,3 %	202	47,0 %	2021,2	0,9473	108	0,454

Критерии достоверности модели

Для оценки приближения и проверки адекватности построенной регрессии для быстрорастущих организаций были рассчитаны коэффициент детерминации R^2 и критерий Фишера F (табл. 2).

Для определения прогнозируемого и непрогнозируемого показателя БРК приближением в виде логистической кривой выявлен параметр P , характеризующийся как отношение среднего значения показателя по годам к значению за последний год – в нашем случае за 2022 год.

$$P_j = \frac{\sum_0^{tN} S_{j,t}}{(N+1)S_{j,N}}, \quad (6)$$

где P – параметр отношения; S – выручка; j – номер компании.

Ниже приведены расчеты критерия Фишера F по множеству выявленных БРК для приближения логистической кривой. Пороговое значение критерия Фишера для уровня статистической значимости $\alpha = 5\%$, количества измерений (точек) $N = 9$, степеней свободы $dN = 6$ составляет $F_{\text{крит}} = 5,82$.

Результаты критерий Фишера по каждой из БРК показаны на рис. 4 (по оси X – номер БРК j в списке, сортировка по выручке 2022 г., черта – $F_{\text{крит}}$). Из 884 выявленных БРК критерий Фишера $F_j \geq F_{\text{крит}}$ выполняется для 714 БРК, для которых логистическое приближение можно признать статистически значимым.

Ручной анализ БРК с не выполняющимся критерием $F_j \geq F_{\text{крит}}$ показывает, что такие компании имеют негладкий профиль роста. Например, после бурного взлета происходит падение. Но организация формально остается БРК, так как итоговый рост удовлетворяет критериям БРК. Отметим по рис. 4, что с уменьшением размера организации с номерами более 800 (после сортировки по выручке 2022 г.) не удовлетворяют критерию Фишера. Для данной выборки БРК это соответствует порогу 1 000 млн. руб.

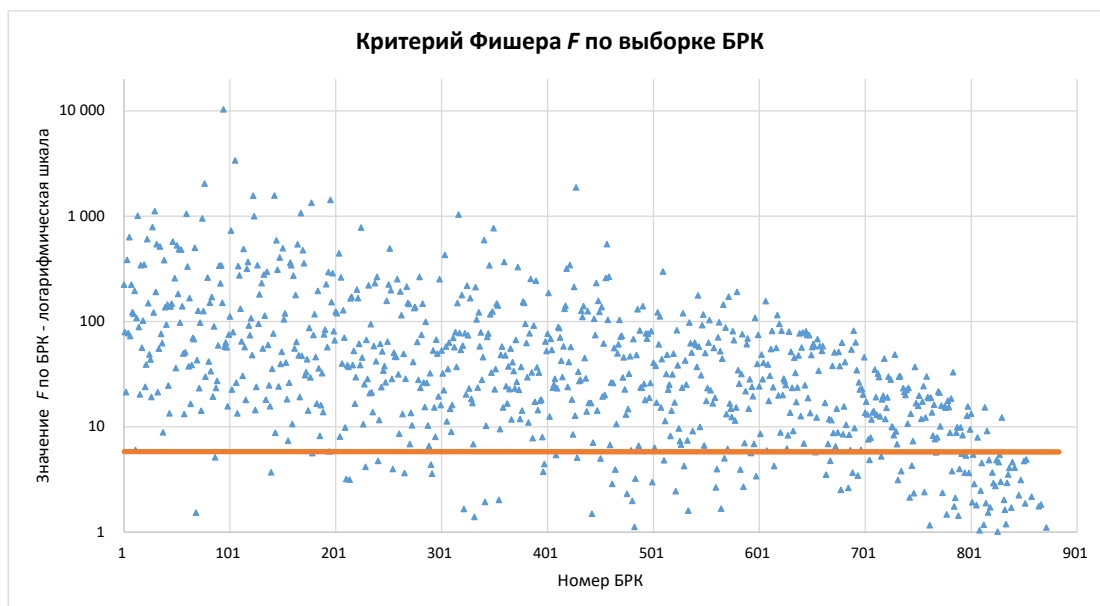


Рис. 4. Критерий Фишера по всем быстрорастущим организациям
Fig. 4. Fisher's criterion for all fast-growing organizations

На рис. 5 представлен график с параметром P_j отношения средней выручки к последней по всем БРК. Из графика видны выпадающие из полосы значения – эти компании относятся к «спадающим» или «скачущим» видам роста значений показателя (выручки) с течением времени, поэтому модель логистической кривой для прогнозирования им не подходит.

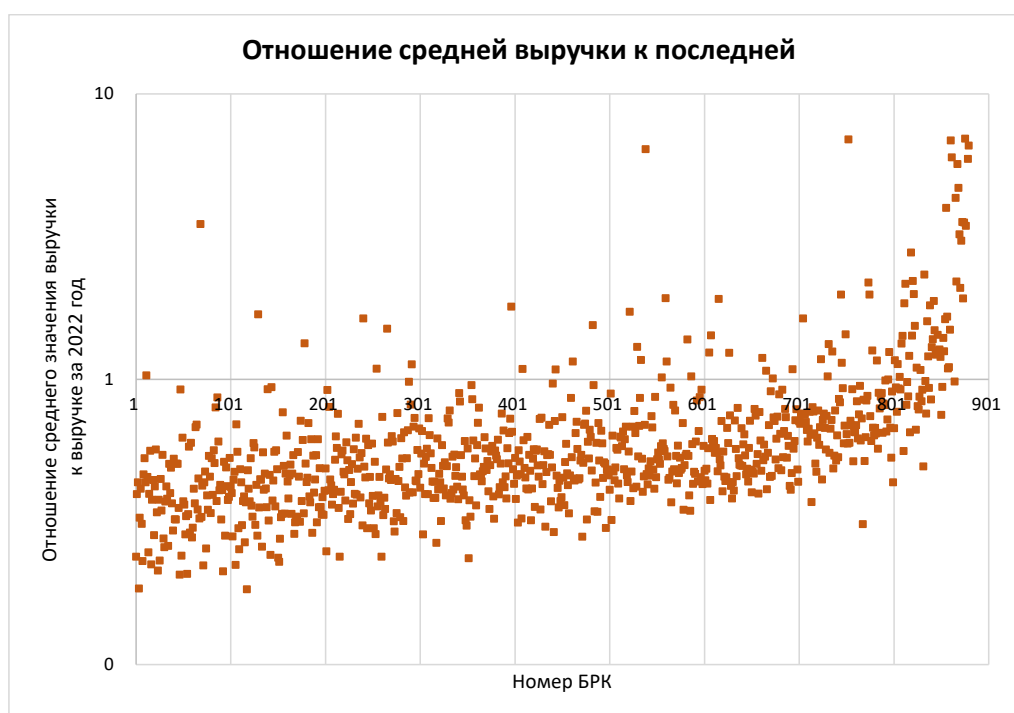


Рис. 5. Критерий P отношения среднего значения к последней выручке по всем быстрорастущим организациям

Fig. 5. P criterion of the ratio of the average to the latest revenue for all fast-growing organizations

Заключение

В рамках работы были рассмотрены быстрорастущие компании (БРК). Для описания их роста была использована логистическая кривая с идентификацией параметров.

Для выборки БРК с ростом выручки более 50 % за последние 8 лет была проведена идентификация параметров логической кривой и сделан прогноз выручки до 2050 года.

Более подробно приведены расчеты прогнозной выручки для компании «Вайлдберриз». Результаты демонстрируют, что с полученными значениями параметров «Вайлдберриз»

может достичь выручки около 4 трлн. рублей и сохранить доминирующую позицию на рынке.

Прогнозы на значимый период времени до 2045 – 2050 гг. выглядят нахальными с учетом текущей турбулентности макроэкономической среды, но в сочетании с другими методами предлагаемый подход к оценке возможностей быстрорастущих компаний позволяет выделять и анализировать наборы компаний – «газелей» с учетом верхнего предела их роста.

Список источников:

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Изд-во физ.-мат. лит.-ры. – 2012. – 604 с.
2. Дуброва Т.А., Архипова М.Ю. Статистические методы прогнозирования в экономике. – 2004. – 136 с.
3. Пащенко Ф.Ф., Иванюк В.А., Абдикеев Н.М. Нейросетевая модель многофакторного анализа экономической эффективности предприятия // Датчики и системы. – 2019. – №10. – С. 9-17.
4. Dranko O.I., Rezchikov A.F. Forecast of the Industry Development as a Large System // IFAC-PapersOnLine, v. 55(3), 2022, pp. 240 – 244.
5. Иванов И.Ф. Использование логистической кривой для оценки стоимости компании на развивающемся рынке // Корпоративные финансы. – 2008. – №1(5). – С. 47-62.
6. Нижегородцев Р.М. Логистическое моделирование экономической динамики. Ч. I // Проблемы управления. – 2004. – №1. – С. 46-53.
7. Birch D., Medoff J. Gazelles. // In: «Labor Markets, Employment Policy, and Job Creation» L.C. Solomon, A.R. Levenson (Eds.). Westview: Boulder, Co. — 1994. — pp.159–168.
8. Симон Г. Скрытые чемпионы XXI века: финансирование, организация и деловое окружение // Российский журнал менеджмента. — 2013. — Том 11. № 3. — с.129-152.
9. Симон Г. Скрытые чемпионы 21 века. Стратегия успеха неизвестных лидеров мирового рынка // М.: Кнорус, - 2015. – 240 с.
10. Симон Г. Скрытые чемпионы – новые правила игры в век Китая. // М.: Библос, – 2021. – 310 с.
11. Долгин А.Н. Феномен компаний-«газелей» в мире и в России // Вестник ЧелГУ. – 2014. – №21 (350). Экономика. Вып. 47. С. 184-191.
12. Кириллов Ю.Г., Коновалов И.А., Енза Э.К. Быстрорастущие компании: качество роста, региональное измерение // Экономика, предпринимательство и право. – 2022. – Том 12. – № 1. – с.103-118. –
13. Юданов А. «Быстрые» фирмы и эволюция российской экономики // Вопросы экономики, «Быстрые» фирмы и эволюция российской экономики – 2007. – №2. – с.85-100.
14. Полунин Ю.А., Юданов А.Ю. Темпы роста компаний и заполнение рыночной ниши // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 2 (179). – с.101-112.
15. Механик А. Газели невысоких технологий // Стимул – 2021. <https://stimul.online/articles/sreda/gazeli-nevysokikh-tekhnologiy/> (дата обращения 20.09.2023).
16. Дранко О.И., Новиков Д.А., Райков А.Н., Чернов И.В. Управление развитием региона: моделирование возможностей. // М.: ЛЕНАНД, – 2023. – 432 с.
17. Московкин В.М., Журавка А.В. Пьер-Франсуа Ферхюльст – забытый первооткрыватель закона логистического роста и один из основателей экономической динамики // Оригинальные исследования. – 2020. – № 7. – С. 207-218.

References:

1. Novikov D.A. Theory of Control in Organizations. Moscow: Fizmatlit; 2012.
2. Dubrova T.A., Arkhipova M.Yu. Statistical Methods of Forecasting in Economics; 2004.
3. Pashchenko F.F., Ivanyuk V.A., Abdikeev N.M. Neural Network Model of Multivariate Analysis of Economic Efficiency of an Enterprise. Sensors and Systems. 2019;10:9-17.
4. Dranko O.I., Rezchikov A.F. Forecast of the Industry Development as a Large System. IFAC-PapersOnLine. 2022;55(3):240-244.
5. Ivanov I.F. The Use of a Logistic Curve to Assess the Value of a Company in a Developing Market. Journal of Corporate Finance Research. 2008;1(5):47-62.
6. Nizhegorodtsev R.M. Logistic Modeling of Economic Dynamics. Part I. Problemy Upravleniya. 2004;1:46-53
7. Birch D, Medoff J. Gazelles. In: Solomon LC, Levenson AR, editors. Labour Markets, Employment Policy, and Job Creation. Westview: Boulder, Co.; 1994. p. 159-168.
8. Simon G. Hidden Champions of the 21st Century: Financing, Organization and Business Environment. Russian Journal of Management. 2013;11(Z):129-152.
9. Simon G. Hidden Champions of the 21st Century. Success Strategies of Unknown World Market Leaders. Moscow: Knorus; 2015.
10. Simon G. The New Game in the Chinese Century. Moscow: Byblos; 2021.
11. Dolgin A.N. Phenomenon of Fast Growing Companies in the World and in Russia. Bulletin of ChelSU. 2014;21(350). Economy. 47:184-191.
12. Kirillov Yu.G., Konovalov I.A., Enza E.K. Fast-Growing Companies: Growth Quality and Regional Dimension. Journal of Economics, Entrepreneurship and Law. 2022;12(1):103-118.
13. Yudanov A. Fast Growing Firms (“Gazelles”) and the Evolution of Russian Economy. Vopreosy Ekonomiki. 2007;2:85-100.
14. Polunin Yu.A., Yudanov A.Yu. Growth Rates of Companies and Filling of a Market Niche. Studies on Russian Economic Development. 2020;2(179):101-112.
15. Mechanic A. Gazelles of Low Technologies. Stimul [Internet]. 2021 [cited 2023 Sep 20]. Available from: <https://stimul.online/articles/sreda/gazeli-nevysokikh-tekhnologiy/>
16. Dranko O.I., Novikov D.A., Raikov A.N., Chernov I.V. Regional Development Management: Modelling Opportunities. Moscow: Lenand; 2023.
17. Moskovkin V.M., Zhuravka A.V. Pierre-François Verhulst – the Forgotten Pioneer of the Law of Logistic Growth and One of the Creators of Economic Dynamics. Original Research. 2020;7:207-218.

18. Разумовская Е.А., Шуклин М.С., Баженова В.И., Панфилова Е.С. Финансовое планирование и прогнозирование; под общ. ред. Е.А. Разумовской. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 284 с.

19. Дранко О.И., Тароян К.К. О модели прогнозирования выручки организации с быстрым ростом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2023. – № 4. – С. 66-75.

20. Открытые данные. Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/opendata/> (дата обращения 20.02.2024).

21. Государственный информационный ресурс бухгалтерской (финансовой) отчетности. [Электронный ресурс]. – URL: <https://bo.nalog.ru/> (дата обращения 20.02.2024).

18. Razumovskaya EA, Shuklin MS, Bazhenova VI, Panfilova ES. Razumovskaya EA, editor. Financial Planning and Forecasting. Yekaterinburg: Ural University Publishing; 2017.

19. Dranko O.I., Taroyan K.K. On a Model for Forecasting the Revenue of an Organization with Rapid Growth. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2023;4:66-75.

20. Open Data. Federal State Statistics Service [Internet] [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://rosstat.gov.ru/opendata/>

21. State Information Resource for Accounting (Financial) Reporting [Internet] [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://bo.nalog.ru/>

Информация об авторах:

Дранко Олег Иванович

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ORCID ID:0000-0002-4664-1335

Тароян Карина Кареновна

магистр Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), ORCID ID: 0009-0000-9662-2100

Information about the authors:

Dranko Oleg Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Leading Research Fellow of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ORCID ID: 0000-0002-4664-1335

Taroyan Karina Karenovna

Master of Science of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), ORCID ID: 0009-0000-9662-2100

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

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

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 11.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 03.05.2024.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-pu@mail.ru

Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченко.

Сдано в набор 15.06.2024. Выход в свет 28.06.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,7.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

