

АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ



В проектировании и управлении

Издается с 2018 года

№ 1(27) 2025

DOI:10.30987/issn.2658-3488

ЕЖЕКАРТАЛЬНЫЙ 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.

Бобырь 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)
Иващенко 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)
Мещеряков 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.

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

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

Носков С.И., д-р. техн. наук, проф. (Иркутск)
Петршин 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)
Чепчурев 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

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

№ 1(27) 2025

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. Mikhalkchenko, 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 – Malakhov A.A. Can.
Eng., Assoc. Prof.*

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 № ФС77-73192 of July 2, 2018

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. Fedyaeva, 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

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

The magazine is distributed by subscription:
index 380855 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

Биткина Е.Е. Автоматизированное проектирование параметрических трехмерных деталей на основе разработки приложения для работы в КОМПАС-3D

**Чепчурев М.С., Четвериков Б.С., Минасова В.Е.,
Баранов Д.С., Санин С.Н.** Автоматическое управление зачистными модулями машины для механической обработки кромок листовых заготовок

Шпандарук В.А., Феофанов А.Н. Разработка автоматизированной системы расчета времени изготовления корпусных деталей на многоцелевых станках в мелкосерийном производстве

Математическое и компьютерное моделирование

Борсук Н.А. Ковров Д.А. Онуфриева Т.А. Анализ вопросов разработки голосового помощника для специализированных библиотек

Управление в организационных системах

**Барзов А.А., Корнеева В.М., Феофанов А.Н.,
Корнеев И.С.** Определение числа критериев экспертного рейтингования объектов анализа информационно-технологического профиля

Меньших В.В., Подольских А.В. Модель оценки длительности группового обучения с учётом ресурсных ограничений организации

Электротехнические комплексы и системы

Батенков К.А., Катков О.Н., Козленко А.В. Анализ погрешности времени и частоты синхросигнала в цифровых системах передачи

**Лукашов Н.А., Суслов В.С., Масонов А.М.,
Маганков О.С.** Оптимизация работы асинхронного тягового привода локомотива за счет снижения температуры обмоток ротора электродвигателя

CONTENTS

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

4 **Bitkina E.E.** Automated Design of Parametric Three-Dimensional Parts Based on the Application Development for Working in Kompas-3D

12 **Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E.,
Baranov D.S., Sanin S.N.** Automatic Control of Deburring Modules in a Machine for the Mechanical Edge Processing of Sheet Metal Blanks

21 **Shpandaruk V.A., Feofanov A.N.** Developing an Automated System for Calculating the Manufacturing Time of Casing Parts on Multi-Purpose Machines in Small-Batch Production

Mathematical and computer modeling

28 **Borsuk N.A., Kovrov D.A., Onufrieva T.A.** Analysis of Development Issues for a Voice Assistant for Specialized Libraries.

Management in organizational systems

36 **Barzov A.A., Korneeva V.M., Feofanov A.N.,
Korneev I.S.** Determining the Number of Criteria for Expert Rating of Analysis Objects of Information Technology Profile

44 **Menshikh V.V., Podolskikh A.V.** Model for Estimating the Duration of Group Training Considering Organizational Resource Constraints.

Electrotechnical complexes and systems

52 **Batenkov K.A., Katkov O.N., Kozlenko A.V.** Analysis of Time and Frequency Error of Synchronization Signals in Digital Transmission Systems

59 **Lukashov N.A., Suslov V.S., Masonov A.M.,
Magankov O.S.** Optimization of the Asynchronous Traction Drive of a Locomotive by Reducing the Temperature of the Electric Motor Rotor Windings

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.021

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-4-11

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТРЕХМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В КОМПАС-3Д

Елена Евгеньевна Биткина[✉]

Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, г.Омск, Россия

eesh03@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7243-2174>

Аннотация. Представлена методика автоматизации части работ конструктора на этапе проектирования параметрической 3D модели за счет применения разработанного приложения для КОМПАС-3Д. Проектирование однотипных деталей затрачивает огромное количество времени, в связи с этим была разработана программа, которая позволяет применять механизмы параметризации для автоматического создания 3D модели заготовки-прототипа. Процесс автоматизации заключается в применении созданного приложения для КОМПАС-3Д, позволяющего использовать параметры, формирующие 3D модель, через окно ввода переменных. Разработанная программа направлена на исключение работы пользователя с булевыми операциями и эскизами и создания библиотеки-приложения для типовых деталей. Разработанное приложение, позволяющее автоматизировать процесс создания 3D модели, реализовано посредством языка программирования Python и приложения КОМПАС-Макро. Предложенная методика автоматизации проектирования параметрических 3D моделей заготовок-прототипов за счет применения автоматизации создания параметрической 3D модели, реализована на примере проектирования детали «стакан». Для оценки эффективности применения данного метода проведен сравнительный анализ временных затрат для моделирования данной детали традиционным способом и булевых операций, и с помощью разработанной программы. В результате установлено, что время работы конструктора на создание 3D модели предложенной детали автоматизированным способом сокращается в несколько раз. Моделирование процесса автоматизированного проектирования параметрической 3D модели заготовки-прототипа на основе предложенного алгоритма реализовано на основе применения теории графов. Данная методика может быть полезна инженеру-программисту, который имеет опыт программирования в Python и навыками разработки конструкторской документации с использованием машиностроительной конфигурации КОМПАС-3Д для создания собственной встроенной библиотеки-приложения, а также инженеру конструктору, который решает задачи для обеспечения технологического суверенитета страны.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, параметрическое моделирование, КОМПАС-Макро, язык программирования Python

Для цитирования: Биткина Е.Е. Автоматизированное проектирование параметрических трехмерных деталей на основе разработки приложения для работы в КОМПАС-3Д // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-4-11.

Original article

Open Access Article

AUTOMATED DESIGN OF PARAMETRIC THREE-DIMENSIONAL PARTS BASED ON THE APPLICATION DEVELOPMENT FOR WORKING IN KOMPAS-3D

Elena E. Bitkina[✉]

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

eesh03@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7243-2174>

Abstract. The paper presents a method for automating a portion of a drafter's work during the parametric 3D model design phase, by using a developed application for KOMPAS-3D. Designing repetitive parts consumes a significant amount of time; therefore, the author has developed a program that enables applying parameterization mechanisms for the automatic creation of a 3D model of a prototype blank. The automation process involves using the created KOMPAS-3D application, which allows parameters that form the 3D model to be manipulated through a variable input window. The developed program aims to eliminate the user's interaction with Boolean operations and sketches, and to create an application library for standard parts. The developed application, which automates the 3D model creation process, is implemented using the Python programming language and the KOMPAS-Macro application. The paper demonstrates the proposed method for automating the design of parametric 3D models of prototype blanks, through automated creation of the parametric 3D model, using the example of designing a "glass" part. To evaluate the effectiveness of this method, the author conducts a comparative analysis of the time spent modelling this part using the traditional method with Boolean operations, and using the developed program. The results show that the drafter's time spent creating the 3D model of the proposed part is reduced several times over using the automated method. Modelling the process of automated design of a parametric 3D model of a prototype blank, based on the proposed algorithm, is implemented using the graph theory. This method can be useful for a programmer-engineer with experience in Python programming and skills in developing design documentation using the mechanical engineering configuration of KOMPAS-3D for creating their own embedded application library, as well as for a design engineer who solves problems to ensure the technological sovereignty of the country.

Keywords: design automation, parametric modelling, KOMPAS-Macro, Python programming language

For citation: Bitkina E.E. Automated Design of Parametric Three-Dimensional Parts Based on the Application Development for Working in Kompas-3D // Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-4-11.

Введение

Применение автоматизированного проектирования изделий приводит к значительному повышению эффективности проектировщика, конструктора и других специалистов, участвующих в разработке проектов. Интенсивное развитие отечественных САПР для обеспечения технологического суверенитета нашей страны привело к совершенствованию их функциональных возможностей и стимулирование интереса к инженерной деятельности. Повышение эффективности труда в современных реалиях требует от инженера глубоких знаний САПР для автоматизированной разработки конструкторской документации и проведения инженерных расчетов. Владение механизмами автоматизации действий конструктора при проектировании с применением технологии реверс-инжиниринга должно стать привилегией при проектировании изделий. Параметрическое моделирование является актуальной составляющей моделирования при использовании программ для разработки конструкторской документации. Однако и при использовании параметрического моделирования конструктор затрачивает огромное количество времени на выполнение повторяющихся действий при проектировании однотипных по форме деталей. Опыт применения интегрированной связки конструкторских программ и макросов показал, что применение параметрического 3D моделирования с использованием программы КОМПАС-3D позволяет проектировщику в несколько раз повысить производительность труда и, что самое важное улучшить качество, и достоверность принимаемых решений [1, 2]. Механизмы параметризации позволяют выполнять множество итераций по нахождению оптимального конструктивного решения за минимальное время, а единая среда – производить расчет для всех этих вариантов.

Как известно, параметризацию, возможно, осуществлять как с использованием 2D, так и 3D графики [3, 4]. При оценке преимуществ параметрического 3D моделирования следует выделить то, что с его помощью выполняется достаточно большой объем проектных работ. Однако использование параметрического 3D моделирования при проектировании изделий с одинаковой геометрией приводит к изменению размеров детали и повторению одних и тех же действий [5, 6]. В связи с этим предложено разработать программное обеспечение, которое позволяет пользователю использовать прототип параметрической 3D модели и изменять ее геометрию вводом значения переменных в окна запроса и не тратить время на создание новой модели, повторяя весь цикл создания тел с использованием графического пакета КОМПА-3D.

Цель работы – создание программного обеспечения для автоматизации опытно-конструкторских работ с применением САПР, при проектировании однотипных деталей. Задача исследования заключается в снижении трудоемкости разработки 3D модели для повторяющихся деталей типа «фланец» или «стакан».

Материалы, модели, эксперименты и методы

Целесообразно автоматизировать часть работы конструктора на примере проектирования детали «стакан» для повышения эффективности работы и выполнения задач по технологическому суворенитету [7]. Автоматизация процесса проектирования однотипных деталей с одинаковой геометрией осуществляется за счет применения разработанного программного математического обеспечение реализованного с использованием Python. Для создания данного типа деталей рассмотрен один из алгоритмов ее проектирования с использованием КОМПАС-3D. Автоматизация работы конструктора осуществляется за счет использования макроса. На первоначальном этапе создается 3D модель детали заготовки-прототипа с использованием макроса. Определенный набор действий, который необходим для создания заготовки-прототипа стакана, записана через КОМПАС-Макрос, а далее программа дорабатывается под требуемый алгоритм для создания детали «стакан» на основе заготовки-прототипа с помощью языка Python.

Компас макро – это программа, позволяющая выполнять алгоритм действий в программе КОМПАС-3D автоматизируя часть работы конструктора при проектировании деталей.

Алгоритм создания макроса в КОМПАС-3D представлен блок-схемой на рис. 1.

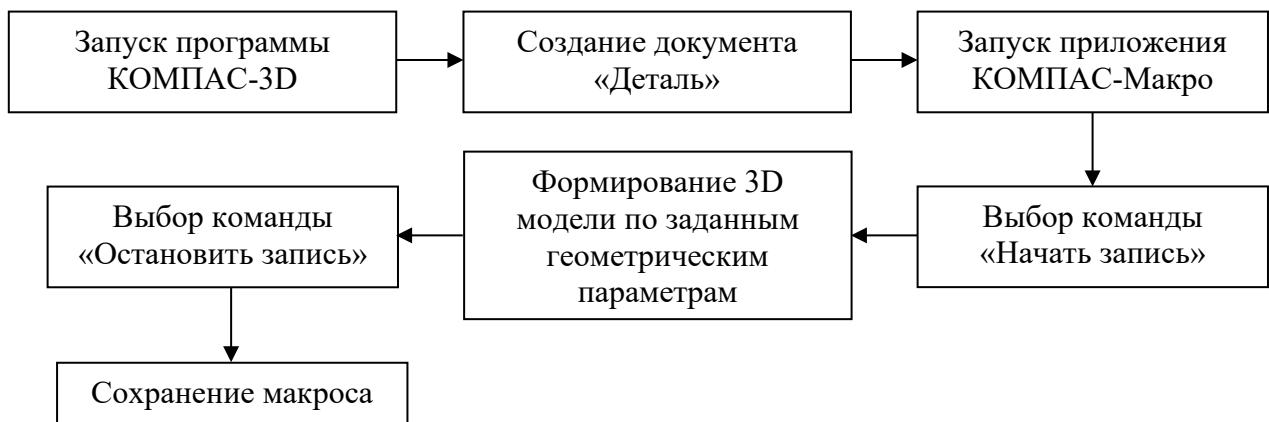


Рис. 1. Алгоритм записи макроса в КОМПАС-3D
Fig. 1. Algorithm for recording a macro in KOMPAS-3D

С помощью данного макроса создается заготовка-прототип детали. С использованием записанного макроса создается программы с применением языка программирования Python, которая позволяет создать приложение для формирования параметрической 3D модели «стакан» и базы данных геометрических параметров изделия. При запуске разработанного приложения в КОМПАС-3D пользователь получал доступ к переменным, формирующими параметрическую 3D модель и через окно ввода параметров, вводит значения переменных, формирующих изделие. На рис. 2 представлено окно ввода геометрических параметров изделия для создания 3D модели.

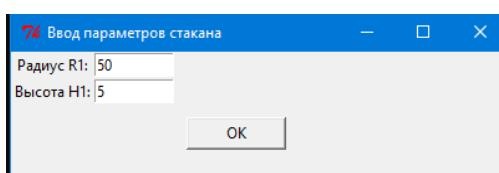


Рис. 2. Окно ввода переменных, формирующих 3D модель стакана
Fig. 2. Window for entering variables that form a 3D model of a glass

Процесс автоматизированного проектирования заготовки-прототипа с использованием разработанного приложения выполняется в следующей последовательности:

- копирование папки с приложением, которое позволяет в программе КОМПАС-3D моделировать данные детали;
- запуск программы КОМПАС-3D;
- вызов приложения КОМПАС-Макро;
- ввод значений переменных, которые формируют заготовку-прототип;
- создание дополнительных элементов, формирующих окончательную 3D модель изделия.

Если проектируемая детали по наличию элементов не отличается от заготовки-прототипа, то последний этап не используется, а конструктор переходит к проведению инженерного анализа или созданию чертежа детали, на основе ассоциативных видов. Применение данного макроса дает предпосылки создания библиотеки с заготовками-прототипами деталей «стакан».

Для моделирования процесса проектирования детали «стакан» на основе заготовки-прототипа с использованием КОМПАС-Макро и установления взаимосвязей используется теория графов [8, 9].

Граф представляет собой совокупность вершин (Q_1, Q_2, \dots) и дуг (ребер) (e_1, e_2, \dots), которые соединяют вершины. Вершины графа определяют конечные дискретные множества, а дуги отражают взаимосвязи между этими множествами. К основным характеристикам графа и его элементам можно отнести следующие понятия. Две вершины (Q_1, Q_2), образующие ребро, называют его концами. Ребро соединяет вершины Q_1 и Q_2 . Две вершины называются смежными, если они соединены одной дугой. Если вершина соединена с ребром его концом, то они называются инцидентными. На рис. 3, *a* вершины Q_1 и Q_2 смежны. Ребра e_1 и e_6 смежны, а e_5 и e_3 не смежны. Вершина Q_5 и ребро e_5 инцидентны. Число ребер, инцидентных вершине Q , определяется степенью вершины и обозначается $\deg Q$. Так, на рис. 3, *a* $\deg Q_1 = 2$, $\deg Q_4 = 3$ [10]. На рис. 3, *б* представлен пример простого неориентированного графа.

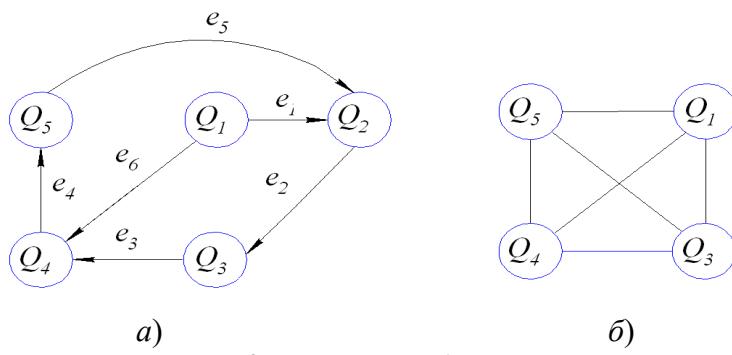


Рис. 3. Примеры изображений графов:
а – ориентированный граф; *б* – полный граф
Fig. 3. Examples of graph images:
a – directed graph; *b* – complete graph

На основе установления взаимосвязей между конечными дискретными множествами с помощью теории графов возможно моделирование процесса проектирования детали «стакан» с использованием макроса. На рис. 4 представлен график, отражающий данный процесс, где P_1, P_2, \dots, P_6 этапы проектирования детали.

Разработанный график имеет простой путь, который модулирует процесс проектирования детали с использованием КОМПАС-Макро, позволяющий автоматизировать часть действий конструктора и описывается следующим выражением:

$$\mu(P_1, P_2, \dots, P_k, P_{k+1}), \quad (1)$$

где P_1, P_2, \dots последовательные вершины, разработанного графа.

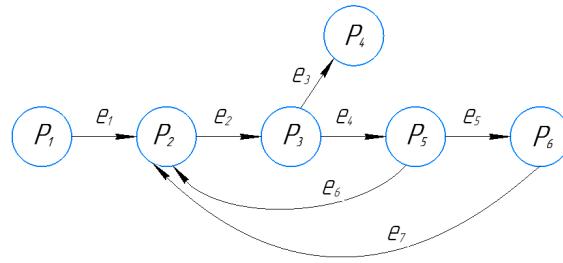


Рис. 4. Граф, отражающий процесс проектирования детали с использованием разработанного приложения

Fig. 4. Graph reflecting the process of designing a part using the developed application

На основе разработанного графа создана блок-схема, которая описывает процесс проектирования изделия на основе разработанного приложения (рис. 5)

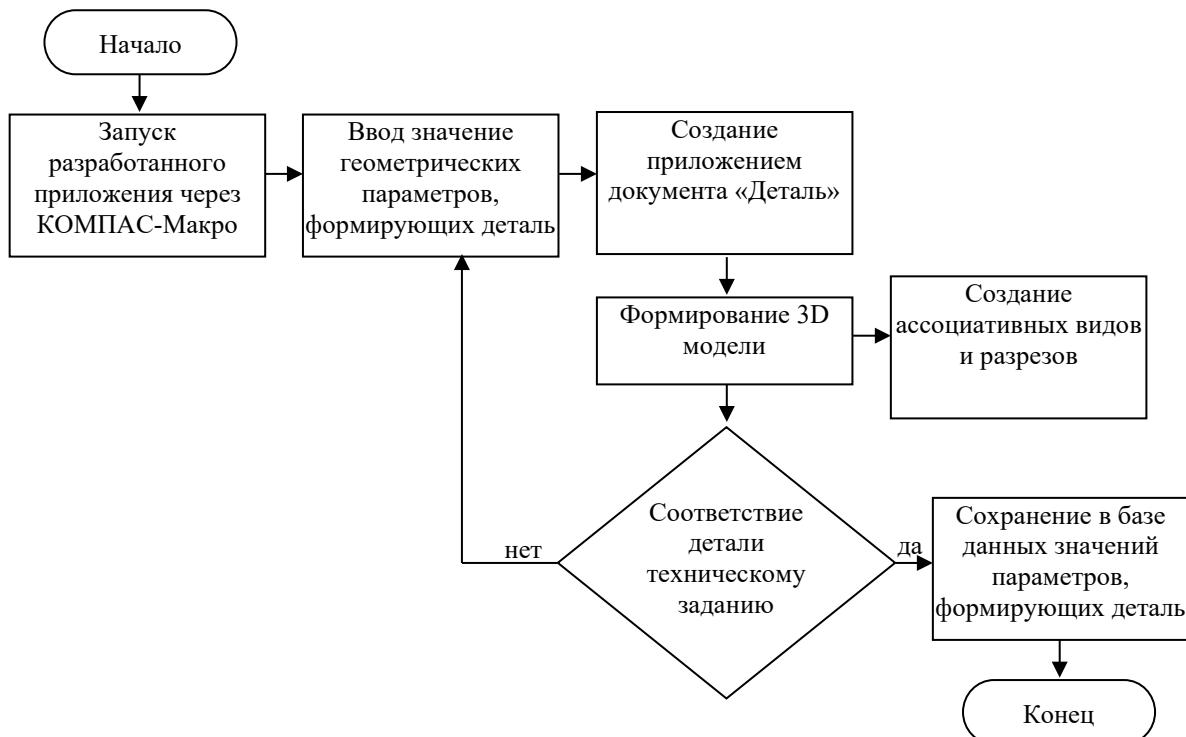


Рис. 5. Блок-схема, поясняющая алгоритм работы с разработанным приложением

Fig. 5. Block diagram explaining the algorithm for working with the developed application

Далее представлена часть разработанной программы, которая используется для работы приложения.

```
from tkinter import *
from tkinter import Tk, StringVar
try:
    f = open('cldr_v01.txt', 'r+')
except:
    f = open('cldr_v01.txt', 'w+')
    f.write("30\n")
    f.write("10\n")
    f.seek(0, 0)
finally:
    lines = f.readlines()
```

```

f.close()
def clicked():
    window.destroy()
def is_valid_float(newval):
    if newval not in '0123456789.':
        return False
    return True
window = Tk()
window.title("Ввод параметров стакана")
window.geometry('400x250')

# Радиус детали R1
lbl_r1 = Label(window, text="Радиус R1:")
lbl_r1.grid(row=0, column=0)
check = (window.register(is_valid_float), "%S")
var_r1 = StringVar()
var_r1.set(lines[0])
ent_r1 = Entry(window, width=10, validate="key", validatecommand=check,
textvariable=var_r1)
ent_r1.grid(row=0, column=1)
# Высота детали H1
lbl_h1 = Label(window, text="Высота H1:")
lbl_h1.grid(row=1, column=0)
check = (window.register(is_valid_float), "%S")
var_h1 = StringVar()
var_h1.set(lines[1])
ent_h1 = Entry(window, width=10, validate="key", validatecommand=check,
textvariable=var_h1)
ent_h1.grid(row=1, column=1)
btn_OK = Button(window, width=10, text="OK", command=clicked)
btn_OK.grid(row=3, column=3, pady=10, padx=10)
window.mainloop()
f = open('cldr_v01.txt', 'w')
.....

```

На рис. 6 представлена 3D модель, которая создана с использованием разработанного приложения.

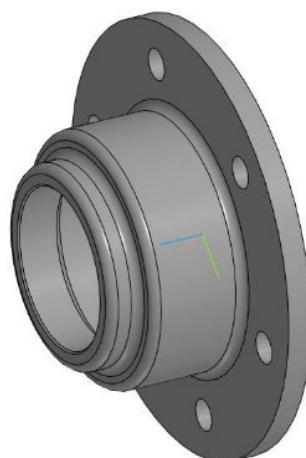


Рис. 6. 3D модель детали, созданная с использованием разработанной программы
Fig. 6. 3D model of the part created using the developed program

Для проверки функционирования данной методики и эффективности практического применения разработанного приложения проведены экспериментальные исследования на примере проектирования деталей фланец в компании ООО «ПромИнтеллект». Инженер компании осуществлял проектирование параметрических 3D моделей деталей фланец с применением данного приложения. Для оценки эффективности работы проведен расчет трудоемкости моделирования параметрической 3D модели с использованием созданной программы и при создании традиционным способом, применяя булевые операции. В результате установлено, что время, затраченное на проектирование данной 3D модели с использованием предложенной программы в 2 раза ниже, по сравнению со временем проектирования традиционным способом.

Также в процессе проектирования создана база данных, в которой сохраняются значения переменных при формировании прототипа-заготовки деталей «стакан», и которая в дальнейшем может служить для создания библиотеки.

Заключение

В результате проделанной работы достигнута автоматизация части процесса проектирования однотипных деталей. Данная автоматизация достигается за счет применения программы, которая позволяет формировать параметрические 3D модели на основе заготовки-прототипа, путем ввода переменных. Разработанная программа интегрируется в систему автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, совершенствуя механизм параметрического моделирования, исключая работу по созданию тел через булевые операции вручную. Предложенный алгоритм параметрического моделирования реализован с использованием языка программирования Python, который позволяет проектировщику или конструктору автоматизировать процесс проектирования конструкторской документации. Применение предложенной методики по созданию однотипных деталей позволяет повысить эффективность работы конструктора за счет снижения трудоемкость разработки однотипных деталей.

Список источников:

1. Единая система конструкторской документации. Общие правила выполнения чертежей. М.: Стандарты, 1988. – 240 с.
2. Особенности трехмерного моделирования на примере проектирования токарно-фрезерного обрабатывающего центра / Е. Кузнецов, К. Курочкин, и др. // САПР и графика. – 2006. – № 5. – С. 71–76.
3. Параметризация – КОМПАС-3D – Аскон: [Электронный ресурс]. URL: https://help.ascon.ru/KOMPAS/22/ru-RU/dlg_parametric_setup.html. (Дата обращения: 17.07.2024).
4. Губич Л.В. Прохорова А.А. Автоматизация проектирования типовых конструкций на базе средств параметризации CAD-систем // Информатика. – 2007. – №4. – С.67–76.
5. Буторов В.В. Автоматизация параметрического моделирования в машиностроительном производстве // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Технические науки. – 2012. – С. 140-141.
6. Гумунюк П.В. Шурпо А.Н. Использование технологии автоматного программирования при разработке приложения для программирования с помощью инструментальных средств // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – № 3. – 2023. – С. 4-12.
1. Unified System for Design Documentation. Basic Requirements for Drawing. Moscow: Standards; 1988.
2. Kuznetsov E, Kurochkin K, et al. Features of Three-Dimensional Modelling on the Example of Designing a Turning and Milling Machining Centre. CAD and Graphics. 2006;5:71-76.
3. Parameterization – KOMPAS-3D – Ascon: [Internet] [cited 2024 Jul 17]. Available from: https://help.ascon.ru/KOMPAS/22/ru-RU/dlg_parametric_setup.html
4. Gubich L.V., Prokhorova A.A. Automation of Standard Structure Design Based on Parametrization Tools of CAD Systems. Informatics. 2007;4:67-76.
5. Butorov V.V. Automation of Parametric Modelling in Mechanical Engineering Production. Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems. Technical Sciences. 2012:140-141.
6. Gumunyuk P.V., Shurpo A.N. Using Automatic Programming Technology in the Application Development for Programming With Tools. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;3:4-12.

References:

7. Биткина, Е.Е. Стадии проектирования изделия в системе T-FLEX // Материалы международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (МЕХ ФАК). – Омск, 2020. – С. 662-665.
8. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1998. – 447 с.
9. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М., 1978. – 432 с.
10. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики / перевод с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
11. Шмуленкова Е.Е. Система автоматизированной разработки чертежей металлорежущих инструментов с использованием методов параметрического трехмерного моделирования дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12: защищена 16.03.2012: утв. 15.07.2013 / Елена Евгеньевна Шмуленкова. – Омск., 2012. – 141 с.
7. Bitkina E.E. Product Design Stages in the T-FLEX System. In: Proceedings of the International Research Conference Dedicated to the 70th Anniversary of Creating the Faculty of Technical Means of the Agro-Industrial Complex (Mechanical Faculty); Omsk: 2020. p. 662-665.
8. Dunaev P.F., Lelikov O.P. Construction of Machine Components and Parts. 5th ed. Moscow: Vysshaya Shkola; 1998.
9. Christofides N. Graph Theory Algorithmic Approach. Moscow; 1978.
10. Rogers D. Procedural Elements for Computer Graphics. Moscow: Mir; 1989.
11. Shmulenkova E.E. Automated Development System for Metal-Cutting Tool Drawings Using Parametric Three-Dimensional Modelling Methods. Candidate of Technical Sciences Thesis. Omsk; 2012.

Информация об авторах:

Биткина Елена Евгеньевна

кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина. <http://orcid.org/0000-0002-7243-2174>

Information about the authors:

Bitkina Elena Evgenievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Service, Mechanics and Electrical Equipment of Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. <http://orcid.org/0000-0002-7243-2174>

Статья поступила в редакцию 04.09.2024; одобрена после рецензирования 04.02.2025; принята к публикации 19.02.2025.

The article was submitted 04.09.2024; approved after reviewing 04.02.2025; accepted for publication 19.02.2025.

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.52

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАЧИСТНЫМИ МОДУЛЯМИ МАШИНЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРОМОК ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОВОК

Михаил Сергеевич Чепчурев^{1✉}, Борис Сергеевич Четвериков²,

Виктория Евгеньевна Минасова³, Денис Сергеевич Баранов⁴,

Сергей Николаевич Санин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

¹ avtpost@mail.ru

² await_rescue@mail.ru

³ vika314tm@mail.ru

⁴ den-3218@yandex.ru

⁵ sanin.sn@bstu.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросам, касающимся управления процессом механической обработки кромок листовых заготовок, а именно их зачистки. Необходимость операции зачистки обусловлена низким качеством поверхностей листового материала, что влечет за собой как снижение качества готовой продукции, так и дополнительные материальные и временные затраты на исправление брака. В связи с этим задача разработки эффективного алгоритма управления зачистными модулями является актуальной. Проведенный анализ временных затрат технологического процесса зачистной машины в условиях реального производства показал, что основные затраты приходятся именно на процесс зачистки листового материала. Авторами предложена конструкция зачистной машины и алгоритм автоматического управления её модулями. Разработанная схема снятия показаний и регистрации износа зачистного круга позволяет регистрировать параметры технологического процесса в реальном времени и корректировать процесс износа абразивного зачистного круга, являющегося основным элементом зачистного модуля. Авторами установлено, что суммарную длину пробега рабочей поверхности зачистного круга можно использовать для прогнозирования износа, а критический диаметр зачистного круга – для ограничения его предельного используемого диаметра. На основе этого было доказано, что алгоритм управления зачистным модулем машины очистки кромок листовых заготовок должен содержать блок, реализующий обратную связь по диаметру абразивного круга и обеспечивающий постоянство скорости резания. Дополнительно задаваемые параметры процесса снятия материала позволяют по значению тока привода при постоянстве скорости резания обеспечивать качество зачищаемой поверхности листа.

Ключевые слова: зачистная машина, абразивный круг, листовая заготовка, автоматическое управление, алгоритм

Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Чепчурев М.С., Четвериков Б.С., Минасова В.Е., Баранов Д.С., Санин С.Н. Автоматическое управление зачистными модулями машины для механической обработки кромок листовых заготовок // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 12-20. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20.

Original article

Open Access Article

AUTOMATIC CONTROL OF DEBURRING MODULES IN A MACHINE FOR THE MECHANICAL EDGE PROCESSING OF SHEET METAL BLANKS

Mikhail S. Chepchurov¹✉, Boris S. Chetverikov², Victoria E. Minasova³, Denis S. Baranov⁴, Sergey N. Sanin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

¹ avtost@mail.ru

² await_rescue@mail.ru

³ vika314tm@mail.ru

⁴ den-3218@yandex.ru

⁵ sanin.sn@bstu.ru

Abstract. This work addresses issues related to controlling the mechanical edge processing of sheet metal blanks, specifically their deburring. The necessity of the deburring operation is due to the low surface quality of sheet material, which leads to both a reduction of finished product quality and additional material and time costs for correcting defects. Therefore, the task of developing an effective control algorithm for deburring modules is highly relevant. An analysis of the time costs of the deburring machine technological process in a real-world production setting has shown that the main costs are associated with deburring sheet material itself. The authors propose a design for a deburring machine and an algorithm for the automatic control of its modules. The developed scheme for taking readings and registering deburring wheel wear allows for the real-time registration of technological process parameters and the correction of the wear process of the abrasive deburring wheel, which is the main element of the deburring module. The authors have established that the total length of the working surface travel of the deburring wheel can be useful to predict wear, and the critical diameter of the deburring wheel can be applicable to limit its maximum usable diameter. Based on this, the work has proven that the control algorithm for the machine deburring module of the sheet metal blank edge cleaning should include a block implementing feedback on the abrasive wheel diameter, ensuring a constant cutting speed. Additionally, predefined parameters for the material removal process, based on the drive current value at a constant cutting speed, allow for ensuring the quality of the deburred sheet surface.

Keywords: deburring machine, abrasive wheel, sheet metal blank, automatic control, algorithm

The study was carried out as part of the federal program for supporting universities «Priority 2030» using equipment based on the High Technology Centre of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E., Baranov D.S., Sanin S.N. Automatic Control of Deburring Modules in a Machine for the Mechanical Edge Processing of Sheet Metal Blanks. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 12-20. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20.

Введение

Производство жестяной тары требует операции подготовки заготовок под сварку. Необходимость в этой операции возникает по причинам низкого качества поверхности листового материала, поступающего производителю, а также брака при нанесении различных лакокрасочных материалов. Автоматической линией производства жестяной тары не предусматривается предварительная зачистка листовых заготовок, что вызывает брак при сварке листа. Авторы столкнулись с задачей исключения брака при изготовлении жестяной тары в автоматической линии, в случае брака при нанесении покрытия и наличия окалины на краях листовой заготовки.

В различных публикациях предлагается решение этой задачи с использованием зачистных машин. Например, некоторые авторы утверждают, что для выполнения зачистки листовых заготовок мало используются зачистные машины, а чаще присутствуют ручные операции [1]. Также в работе [2] проведен анализ способов очистки листового материала как традиционными механическими способами, так и современными, еще мало используемыми, такими как лазерная и криогенная очистка. Авторы этих работ делают упор на ручную очистку, но такая очистка не пригодна при высокой производительности оборудования, например, при производительности автоматической линии до 40...50 изделий в минуту. В этом случае для выполнения зачистки требуется автоматическое оборудование. Так, например, при производительности автоматической линии 40 изделий в минуту для сохранения такта выпуска требуется производительность зачистного оборудования не менее

45 изделий в минуту [3]. При этом скорость перемещения заготовки зависит от длины зачищаемой полосы, т.е. время выполнения зачистной операции складывается из времени подачи листа в зону зачистки, времени прохождения листа через зону зачистки, а также времени стопирования листа (рис. 1).



Рис. 1. Схема временных затрат процесса работы зачистной машины
Fig. 1. Scheme of time consumption of the stripping machine operation process

Согласно схеме, показанной на рис. 1, значительное время в производственном цикле составляет время зачистки, но это требование самого процесса. При цикле зачистки примерно 1,5 с, время зачистки составляет примерно 1 с. При максимальной длине заготовки 500 мм скорость её перемещения составляет 0,5 м/с. Многие авторы при подобной производительности отдают предпочтение механическим способам очистки [4, 5], выполняемым с использованием специального инструмента, например, иглофрез [6]. Этот способ очистки имеет свои неоспоримые преимущества по производительности и стойкости инструмента, но из-за свойств самого инструмента не представляется возможность обеспечить точность кромки покрытия, полученного полиграфией.

В то же время для обеспечения точности кромки возможно использование абразивных кругов на различной связке, чаще всего рекомендуются круги на бакелитовой связке или круги на полимерной связке.

При этом присутствует необходимость выбора инструмента по стойкости и производительности, что требует проведения экспериментальных исследований. Создание отдельной экспериментальной установки – эффективный, но затратный метод.

По этой причине авторами было принято решение о создании установки с зачистными модулями, а подбор круга предлагается выполнить по результатам экспериментального исследования.

Оборудование и методы

В качестве зачистных модулей используются устройства, конструкция которых представлена на рис. 2. Устройства имеют приводы абразивного диска, расположенные на качалках, являющихся основаниями под приводы.

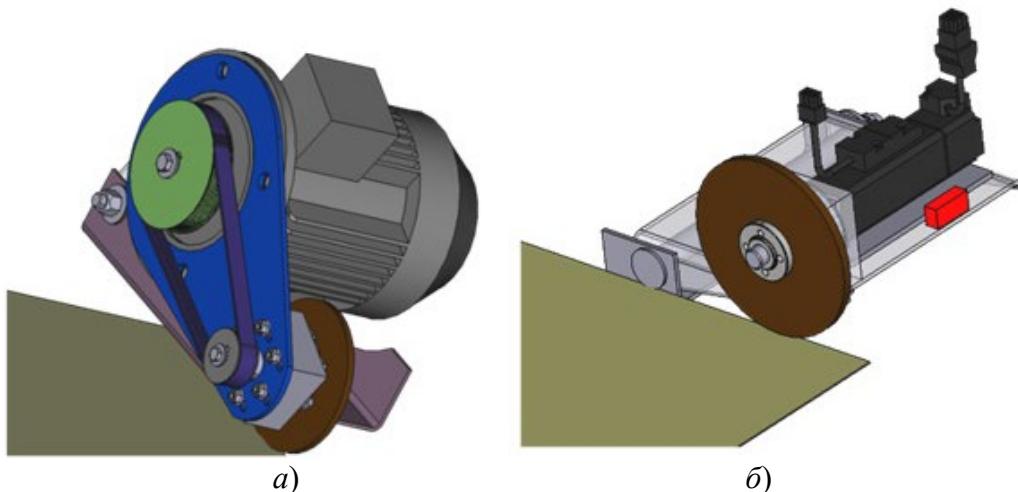


Рис. 2. Конструкции зачистных модулей:
Fig. 2. Designs of stripping modules:
 а – с поликлиновой передачей; б – с прямым высокоскоростным приводом
a – with poly-V-belt transmission; b – with direct high-speed drive

Приводы имеют шпиндельные узлы, на выходных валах которых установлены абразивные зачистные диски. Отличие модуля, представленного на рис. 2, *а*, от модуля, представленного на рис. 2, *б*, состоит в том, что в модуле, показанном на рис. 2, *а*, вращающий момент от двигателя к абразивному диску передаётся с помощью поликлиновремённой передачи, а в модуле на рис. 2, *б* вал двигателя напрямую с помощью эластичной муфты соединён с валом шпинделя, на котором установлен абразивный диск.

В первом случае возможно использование обычного асинхронного двигателя, а во втором – специального высокоскоростного. Качалки имеют возможность поворота вокруг оси, установленной в основание.

При реализации схемы, согласно [7], данные о диаметре круга, полученные с помощью акселерометра *A* заносятся в обычные текстовые файлы, которые потом можно обработать любым редактором электронных таблиц, при этом регистрируется ток, потребляемый приводом. То есть это данные из ЧП, управляющего частотой вращения двигателя *M*, который посредством ременной передачи связан со шпинделем круга. Сбор данных о положении шпинделя круга и тока двигателя выполняется программируемым логическим контроллером (*PLC*), через который данные о положении шпинделя, частоте вращения вала двигателя, потребляемом токе по интерфейсу *RS485* с использованием протокола *MODBUS RTU* передаются в ПК (рис. 3).

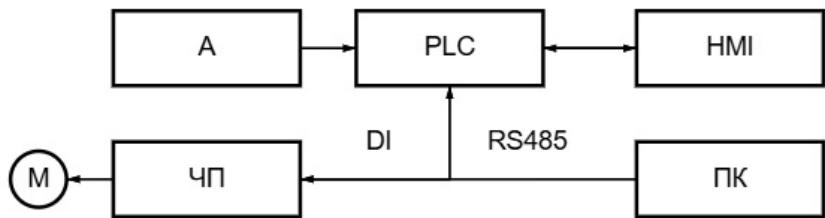


Рис. 3. Схема управления зачистным модулем:

A – акселерометр; *PLC* – программирующий логический контроллер; *HMI* – панель оператора; ПК – персональный компьютер с *Simple SCADA*; ЧП – частотный преобразователь; *M* – асинхронный двигатель

Fig. 3. Stripping module control circuit:

A – accelerometer; *PLC* – programming logic controller; *HMI* – operator panel; *PC* – personal computer with *Simple SCADA*; *FC* – frequency converter; *M* – asynchronous motor

Рассмотрим более подробно схему сбора данных. Для быстрой фиксации положения абразивного круга предпочтительно использовать передачу аналогового сигнала в *PLC*. Для этого используется аналоговый вход. Управление частотным преобразователем возможно по разным каналам, например, с использованием аналогового датчика частоты или по *RS485*. В последнем случае требуется обозначение *PLC* флагом «мастер сети», *SCADA* в ПК также должен быть установлен флагок «мастер сети», однако два флагка «мастер сети» в *RS485* установить не представляется возможным. По этой причине обозначаем флагком «мастер сети» *SCADA*, а приводом управляем с помощью аналогового сигнала *DI*. Настройки привода, управление приводом, управление сбором показаний тока и положения абразивного диска выполняется через панель оператора *HMI*. Остановимся на схеме съема показаний акселерометра для определения текущего диаметра зачистного диска, представленной на рис. 4.

Согласно схеме, представленной на рис. 4, в процессе работы круг 2 изнашивается с диаметром d_{kp} до диаметра d_{kprt} , т.е. изменяется расстояние O_kL_u на величину Δ , которую можно найти по формуле (1):

$$\Delta = \frac{d_{kp} - d_{kprt}}{2}, \quad (1)$$

Поскольку расстояние между осью качания и осью шпинделя круга постоянно, то износ круга O_kL_u можно найти по формуле (2):

$$O_kL_u = O_kO \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где α – угол, величина которого определяется с помощью акселерометра, $^{\circ}$.

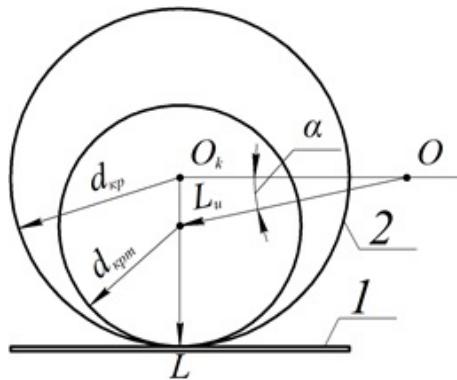


Рис. 4. Схема измерений диаметра круга:

1 – лист; 2 – зачистной круг

Fig. 4. Circle diameter measurement diagram:

1 – sheet; 2 – cleaning wheel

При этом, в зависимости от величины угла устанавливает частоту вращения круга. Обычно рабочая скорость периферийной поверхности круга указывается на его боковой поверхности. Для кругов на полимерной связке рабочая скорость составляет 40 м/с, отсюда следует, что частота вращения вала шпинделя круга, которую можно рассчитать по формуле (3), будет равна:

$$n_{шт} = \frac{1000 \cdot V}{\pi(d_{kp} - 2 \cdot O_k O \cdot \cos \alpha)}, \quad (3)$$

где V – рабочая скорость зачистного круга, м/с.

Эта формула (3) реализуется в алгоритме поддержания постоянной скорости периферии зачистного круга. Но существует фактор предельной рабочей частоты вращения вала шпинделя круга, определяемый, в значительной степени, качеством используемых в шпинделе подшипников.

Износ абразивного круга можно рассмотреть, как спираль. То есть имея износ рабочей поверхности круга по периферии как изменение диаметра круга, можно попытаться спрогнозировать его диаметр, но при этом следует ограничиться определенными условиями, например, тем что, на 1 м круга его радиус уменьшается на 0,1 мм при постоянной рабочей скорости.

Если следовать рассуждениям, приведенным в [7], то бесконечно малый отрезок дуги можно рассчитать по формуле (4):

$$dl = \sqrt{d\rho^2 + dh^2}, \quad (4)$$

где $d\rho$ – приращение радиуса ρ , при перемещении угла ϕ или $d\phi$, а также $dh^2 = \rho^2 d\phi^2$.

Отсюда получаем выражение (5):

$$dl = \sqrt{d\rho^2 + \rho^2 d\phi^2}. \quad (5)$$

Авторы в [6] приходят к выражению определение дуги архimedовой спирали в виде следующей формулы (6):

$$L = \frac{k}{2} [\phi \sqrt{1 - \phi^2} + \ln(\phi + \sqrt{1 + \phi^2})], \quad (6)$$

где k – смещение точки на спирали по лучу при повороте на один радиан, которое находится через шаг спирали t по формуле (7):

$$k = \frac{t}{2\pi}. \quad (7)$$

При постоянном шаге спирали t расстояние, которое не проходит точка контакта периферии круга, можно найти, используя формулу из [9], но согласно [10] при изменении диаметра круга изменяется пятно контакта, а именно уменьшается. К тому же принимая величину износа по линейной длине круга, учитываем, что при этом меняется диаметр, что доказывает постоянство поддерживаемой скорости.

Таким образом, задавшись износом на диаметр можно приблизительно спрогнозировать износ круга. Согласно формуле (7): приняв износ на диаметр, как величину шага архimedовой спирали, можно спрогнозировать остаточный диаметр круга, но предварительно определив суммарный угол ϕ .

То есть получается, что мы снова возвращаемся к суммарному пробегу периферийной поверхности:

$$L_T < L_{kp}, \quad (8)$$

где L_T – текущий пробег, мм; L_{kp} – критический допустимый пробег, мм.

Согласно рис. 5: $d\rho$ и есть текущий радиус круга, то есть $-d_{kp} = 2d\rho$. Это при известном и заданном шаге t и подсчитанном угле ϕ приводит к определению текущего износа.

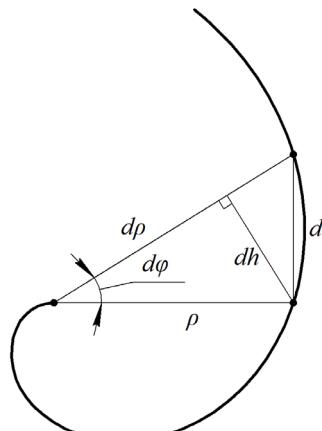


Рис. 5. Схема для расчета бесконечно малого отрезка спирали
Fig. 5. Scheme for calculating an infinitesimal segment of a spiral

Задавшись всем вышеперечисленным, изменим схему, представленную на рис. 3 и получим схема снятия показаний и регистрации износа зачистного круга, показанную на рис. 6.

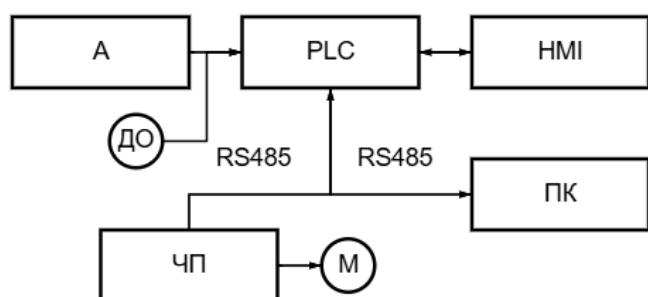


Рис. 6. Схема снятия показаний и регистрации износа зачистного круга
Fig. 6. Scheme for taking readings and recording wear on the grinding wheel

В схеме на рис. 6 появился датчик оборотов – ДО, в качестве которого может выступать энкодер или простой счетчик оборотов на основе датчика Холла.

Так как предпочтительным является подсчет только количества оборотов, то энкодер является непредпочтительным вариантом с точки зрения стоимости, в связи с тем, что снятие и подсчет его показаний требует больших временных и материальных затрат, а также для достижения приемлемого износа инструмента требуется совершить большое количество оборотов.

Результаты и обсуждение

Таким образом, в результате рассуждений мы получили два критических параметра: суммарную длину пробега рабочей поверхности L_{kp} и критический диаметр круга d_{kp} . Если первый параметр (L_{kp}) не ограничен ничем, кроме ширины рабочей поверхности, то второй

параметр ($d_{\text{крт}}$) ограничен конструктивными характеристиками зачистного модуля. Следовательно, суммарную длину пробега рабочей поверхности можно использовать для прогнозирования износа, а критический диаметр круга – для ограничения предельного используемого диаметра инструмента. Представим алгоритм управления модулем в виде блок-схемы, изображенной на рис. 7.

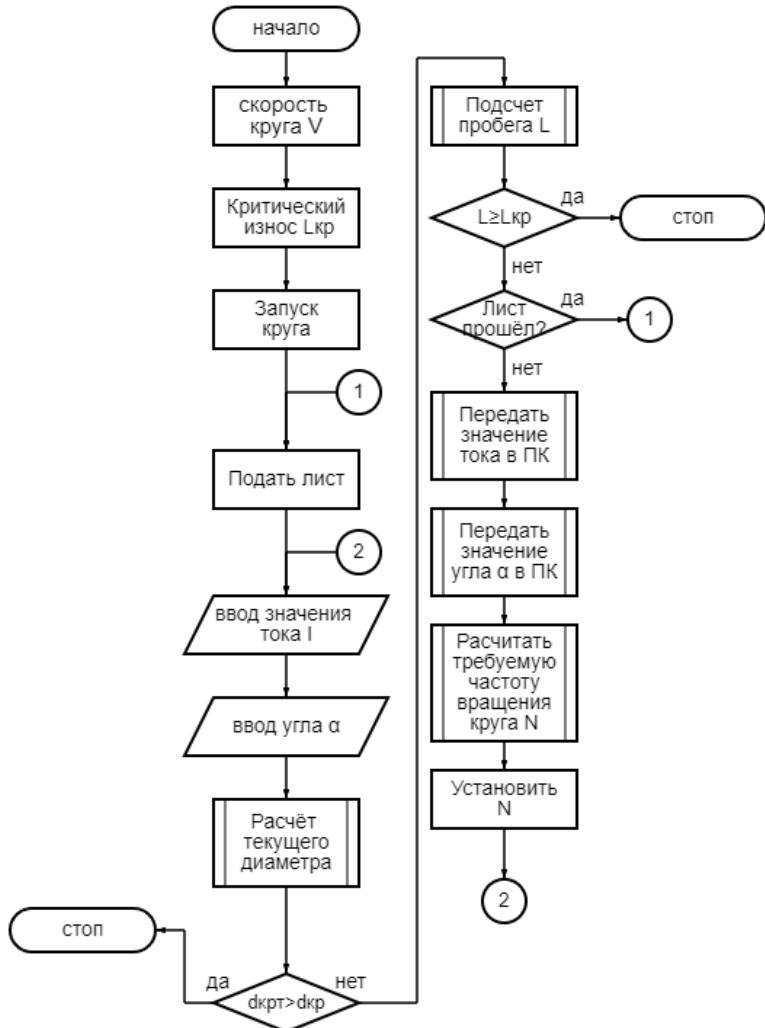


Рис. 7. Блок-схема алгоритма регистрации значений параметра инструмента и тока привода
Fig. 7. Control flow chart for recording the values of the tool parameter and drive current

Полученные значения диаметров и силы тока можно использовать для нахождения критического значения пути, а также для нахождения других показателей процесса, например, глубины резания и скорости перемещения зачищаемого листа. Например, скорость перемещения зачищаемого листа v_d можно представить следующим образом:

$$v_{\eta} = f(V, b, \delta), \quad (9)$$

где V – скорость вращения круга, мм/об; b – ширина круга, мм; δ – глубина резания, мм.

Аналогично, по результатам исследования полученных образцов скорость перемещения зачищаемого листа v_d также можно представить в виде:

$$v_n = f(V, I), \quad (10)$$

где I – сила тока, зависящая от ширины круга и глубины резания.

При этом параметры, от которых зависит ток оказывают влияние на качество получаемой поверхности. К этим параметрам сложно отнести глубину съема материала и скорость перемещения заготовки.

Ширина абразивного круга связана с шириной зачищаемой полосы, но и она оказывает влияние на потребляемый приводом ток.

Заключение

Таким образом можно сделать вывод, о том, что алгоритм управления зачистным модулем машины для механической обработки кромок листовых заготовок должен содержать блок, реализующий обратную связь по диаметру абразивного круга и обеспечивающий постоянство скорости резания.

Дополнительно задаваемые параметры процесса снятия материала позволяют по значению тока привода при постоянстве скорости резания обеспечивать качество зачищаемой поверхности листа.

Список источников:

1. Baron Y.M. Magnetic abrasive deburring technology for blanks // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2016. – № 25. – С. 1-10.
2. Ягяев Э.Э., Шрон Л.Б. Повышение эффективности и качества очистки поверхности листового металла методом лазерной абляции // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3(77). – С. 217-223.
3. Чепчурев М.С., Четвериков Б.С. Автоматизация производственных процессов. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 274 с.
4. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Минимизация трудоёмкости технологической последовательности «дробеударное формообразование-зачистка» при изготавлении листовых деталей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2006. – № 8(12). – С. 42-45.
5. Галеня И.Н., Кожухова М.С., Вишневский В.С., Коркишко А.Н. Применение и преимущества технологии лазерной очистки металла в сравнение с традиционной пескоструйной обработкой // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 2. – С. 116-120.
6. Чепчурев М.С., Четвериков Б.С., Минасова В.Е., Челядинов Д.В. Разработка алгоритма процесса снятия припуска дисковой иглофрезой с учетом угла зоны контакта иглофрезы и заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 50-58.
7. Чепчурев М.С. Измерение и регистрация тока в цепи привода // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2008. – № 9. – С. 46-48.
8. Соловьев А.И., Джафарова Ш.И., Савельева Л.В. Отделочно-зачистная обработка в условиях автоматизированного производства // Технология машиностроения. – 2019. – № 8. – С. 13-18.
9. Jiang L., Yang Z., Li Y. An optimized calculation method of the grinding wheel profile for the helical flute forming grinding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – № 132. – С. 1649-1664.
10. Yagyaev E. Stabilization of processing quality parameters at cylindrical external grinding by control of the rotational frequency of the grinding wheel // Materials Today Proceedings. – 2020. – № 38. – С. 1882-1885.
1. Baron Y.M. Magnetic Abrasive Deburring Technology for Blanks. International Journal of Engineering Research in Africa. 2016;25:1-10.
2. Yagyaev E.E., Shron L.B. Increasing the Efficiency and Quality of Cleaning the Surface of Sheet Metal by Laser Ablation Method. Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2022;3(77):217-223.
3. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S. Automation of Productions. Moscow: INFRA-M; 2019.
4. Pashkov A.E., Chapyshev A.P. Minimizing the Labour Intensity of the Technological Sequence “Shot Impact Shaping-Cleaning” in Manufacturing Sheet Parts. Modern Technologies. System Analysis. Modelling. 2006;8(12):42-45.
5. Galenya I.N., Kozhukhova M.S., Vishnevsky V.S., Korkishko A.N. Application and Advantages of the Technology Laser Cleaning of Metal in Comparison With Traditional Sandblasting. Scientific and Technical Volga Region Bulletin. 2024;2:116-120.
6. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E., Chelyadinov D.V. Development of an Algorithm for the Process of Removing Stock With a Disk Needle Cutter Taking Into Account the Angle of the Contact Zone of the Needle Cutter and the Workpiece. Izvestiya TulGU. Technical Sciences. 2023;3:50-58.
7. Chepchurov M.S. Current Measurement and Registration in the Machine Drive Circuit. Repair. Reconstruction. Modernization. 2008;9:46-48.
8. Soloviev A.I., Dzhafarova Sh.I., Savelyeva L.V. Finishing and Cleaning Treatment in the Automated Production Condition. Technology in Mechanical Engineering. 2019;8:13-18
9. Jiang L., Yang Z., Li Y. An Optimized Calculation Method of the Grinding Wheel Profile for the Helical Flute Forming Grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024;132:1649-1664.
10. Yagyaev E. Stabilization of Processing Quality Parameters at Cylindrical External Grinding by Control of the Rotational Frequency of the Grinding Wheel. Materials Today Proceedings. 2020;38:1882-1885.

References:

1. Baron Y.M. Magnetic Abrasive Deburring Technology for Blanks. International Journal of Engineering Research in Africa. 2016;25:1-10.
2. Yagyaev E.E., Shron L.B. Increasing the Efficiency and Quality of Cleaning the Surface of Sheet Metal by Laser Ablation Method. Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2022;3(77):217-223.
3. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S. Automation of Productions. Moscow: INFRA-M; 2019.
4. Pashkov A.E., Chapyshev A.P. Minimizing the Labour Intensity of the Technological Sequence “Shot Impact Shaping-Cleaning” in Manufacturing Sheet Parts. Modern Technologies. System Analysis. Modelling. 2006;8(12):42-45.
5. Galenya I.N., Kozhukhova M.S., Vishnevsky V.S., Korkishko A.N. Application and Advantages of the Technology Laser Cleaning of Metal in Comparison With Traditional Sandblasting. Scientific and Technical Volga Region Bulletin. 2024;2:116-120.
6. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E., Chelyadinov D.V. Development of an Algorithm for the Process of Removing Stock With a Disk Needle Cutter Taking Into Account the Angle of the Contact Zone of the Needle Cutter and the Workpiece. Izvestiya TulGU. Technical Sciences. 2023;3:50-58.
7. Chepchurov M.S. Current Measurement and Registration in the Machine Drive Circuit. Repair. Reconstruction. Modernization. 2008;9:46-48.
8. Soloviev A.I., Dzhafarova Sh.I., Savelyeva L.V. Finishing and Cleaning Treatment in the Automated Production Condition. Technology in Mechanical Engineering. 2019;8:13-18
9. Jiang L., Yang Z., Li Y. An Optimized Calculation Method of the Grinding Wheel Profile for the Helical Flute Forming Grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024;132:1649-1664.
10. Yagyaev E. Stabilization of Processing Quality Parameters at Cylindrical External Grinding by Control of the Rotational Frequency of the Grinding Wheel. Materials Today Proceedings. 2020;38:1882-1885.

Информация об авторах:

Чепчуро́в Михаи́л Серге́евич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Четверико́в Бори́с Серге́евич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные и дорожные машины» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Мина́сова Виктория Евгеньевна

ассистент кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Барано́в Дени́с Серге́евич

ассистент кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Санин Серге́й Никола́евич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Information about the authors:

Chepchurov Mikhail Sergeevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Chetverikov Boris Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Hoist and Road Machines of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Minasova Victoria Evgenievna

Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Baranov Denis Sergeevich

Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Sanin Sergey Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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 15.11.2024; одобрена после рецензирования 13.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 13.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.

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 658.512

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-21-27

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ В МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Владислав Александрович Шпандарук^{1✉}, Александр Николаевич Феофанов^{2✉}

^{1, 2} МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Россия

¹ vlad.shpandaruk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9898-8621>

² feofanov.fan1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4761-0538>

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания автоматизированной системы расчета времени изготовления корпусных деталей на многоцелевых станках в мелкосерийном производстве. Раскрывается актуальность данной темы в современном быстременяющемся мире. Рассмотрены вопросы выбора оптимального оборудования при изготовлении вновь заказываемой продукции. Определяется время изготовления продукции на имеющемся на предприятии оборудовании с учетом материала, точности, формы, размеров, шероховатости и т.д. Находятся зависимости данных параметров от времени изготовления детали.

Ключевые слова: автоматизированная система, время изготовления, себестоимость продукции, производственное предприятие, опытное производство, мелкосерийное производство, расчет, анализ и выбор оптимального оборудования, управление производством

Для цитирования: Шпандарук В.А., Феофанов А.Н. Разработка автоматизированной системы расчета времени изготовления корпусных деталей на многоцелевых станках в мелкосерийном производстве // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 21-27. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-21-27.

Original article

Open Access Article

DEVELOPING AN AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING THE MANUFACTURING TIME OF CASING PARTS ON MULTI-PURPOSE MACHINES IN SMALL-BATCH PRODUCTION

Vladislav A. Shpandaruk^{1✉}, Alexander N. Feofanov^{2✉}

^{1, 2} MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

¹ vlad.shpandaruk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9898-8621>

² feofanov.fan1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4761-0538>

Abstract. This paper examines the creation of an automated system for calculating the manufacturing time of casing parts on multi-purpose machines in small-batch production. The work highlights the relevance of this theme in today's rapidly changing world; discusses the issues related to selecting the optimal equipment for manufacturing newly ordered products. The work determines the production time for goods manufactured at the enterprise's existing equipment, taking into account material, precision, shape, dimensions, roughness, and other factors; establishes the relationships between these parameters and the part manufacturing time.

Keywords: automated system, production time, production cost, manufacturing enterprise, pilot production, small-batch production, calculation, analysis and selection of optimal equipment, production management

For citation: Shpandaruk V.A., Feofanov A.N. Developing an Automated System for Calculating the Manufacturing Time of Casing Parts on Multi-Purpose Machines in Small-Batch Production. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 21-27. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-21-27.

Введение

Современное машиностроение характеризуется постоянным ростом требований к качеству и точности изготовления изделий, что особенно актуально в условиях мелкосерийного производства. При этом одним из ключевых факторов успешного функционирования производства является планирование и управление трудозатратами. Важность расчета трудоемкости операций производства корпусных деталей возрастает в связи с ростом сложности геометрии изделий и технологических процессов их обработки.

Традиционные методы расчета трудоемкости, основанные на нормативных данных, часто оказываются недостаточно точными и оперативными [1]. В условиях мелкосерийного производства, где продукция постоянно меняется, требуется внедрение автоматизированных систем расчета трудоемкости. Данная система позволит оперативно рассчитывать трудоемкость процесса, оценивать себестоимость и целесообразность выполнения заказа на ранних стадиях проектирования. Более того, поскольку одно и то же изделие может изготавливаться за разное время на различных видах оборудования, система будет учитывать эти различия и предоставлять возможность выбора наиболее эффективного варианта производства [2].

Фрезерная обработка на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) является одним из наиболее распространенных методов механической обработки корпусных деталей. Разработка системы, позволяющей автоматизировать процесс расчета трудоемкости для фрезерной обработки, является важной задачей, способной значительно повысить эффективность производства.

Актуальность исследования

Производственные процессы требуют все более точного и быстрого расчета времени на выполнение операций. Мелкосерийное производство, с его высокой вариативностью и небольшими партиями, требует особого подхода к планированию, так как каждый запуск новой детали требует точных расчетов, чтобы избежать потерь. В этих условиях разработка автоматизированной системы расчета времени для многоцелевых станков, особенно на ранних этапах подготовки производства, становится важной задачей. Такая система позволит не только оценить время изготовления новой детали, но и на основе этих данных рассчитать её себестоимость и определить, насколько выгодно для предприятия производство данной детали.

Кроме того, важно учитывать, что время изготовления одной и той же детали может варьироваться в зависимости от типа используемого оборудования. Разработка системы, которая позволит рассчитать время для разных вариантов станков, является важным шагом для оптимизации производственных процессов и повышения их эффективности.

Анализ существующих систем

В настоящее время существует достаточное количество автоматизированных систем для определения трудоемкости. Самые популярные из них:

1. *ADEM. NTR*. Модуль «Нормирования и технологические расчеты» позволяет производить нормирование в автоматизированном режиме для механической обработки и сборки.

2. Система *T-FLEX* Технологическое нормирование. Система реализована на базе программы *T-FLEX* Технология для инженеров-технологов.

3. СПРУТ-ТП «Нормирование».

4. Нормирование труда. Аскон.

5. САПР-ТП «Линейка».

Были рассмотрены достоинства и недостатки каждой из рассмотренных систем. Результаты приведены в табл. 1.

Сравнительный анализ существующих систем
Comparative analysis of existing systems

Таблица 1

Table 1

Функция системы/Наименование		<i>ADEM. NTR</i>	СПРУТ-ТП «Нормирование»	Система <i>T-FLEX Технологическое нормирование</i>	Нормирование труда. Аскон	САПР-ТП «Линейка»
Нормирование на стадии разработки ТП	+	+	+	+	+	
Нормирование на ранних стадиях подготовки производства	+	-	-	-	-	+
Работает как самостоятельная система	-	+	+	+	+	+
Учитывает при расчетах вариативность оборудования, инструмент и режимы резания	+	+	+	+	+	+
Требует высокую квалификацию нормировщика	-					+
Обладает высокой точностью нормирования	-					-
Учитывает при расчетах вариативность оборудования	+					-
Учитывает при расчетах инструмент и режимы резания	+					+

По результатам анализа видно, что существующие автоматизированные системы или отдельные модули для нормирования технологических процессов широко применяются в производстве для нормирования ТП. Прогнозное нормирование или нормирования на ранних стадиях подготовки производства применяется только в некоторых системах, *ADEM. NTR* и САПР-ТП «Линейка». В *ADEM. NTR* нормирование производится по деталям аналогам и не учитывает вариативность имеющегося на предприятие оборудования, поэтому не обладает высокой точностью. В САПР-ТП «Линейка» нормирование происходит по информационной модели изделия, которая определяется по параметрам детали, в связи с чем возникает необходимость в высокой квалификации нормировщика, который должен провести углубленный анализ конструкторской документации. А также САПР-ТП «Линейка» не учитывает имеющееся на предприятии оборудование, что не позволяет с высокой точностью оценить норму времени. *ADEM. NTR* и САПР-ТП «Линейка» хорошо подходят для нормирования на ранних стадиях подготовки производства в массовом и серийном производстве с однотипным парком станков [3].

Исходя из этого задача разработки автоматизированной системы расчета времени изготовления корпусных деталей на многоцелевых станках в мелкосерийном производстве является актуальной задачей, особенно на ранней стадии подготовки производства, когда еще не разработан технологический процесс и нет определенности на каком оборудовании будет производится деталь.

Описание системы

АСРВИД – автоматизированная система расчета времени изготовления корпусных деталей на многоцелевых станках в мелкосерийном производстве. Главная задача данной системы – это быстрый и качественный расчет времени изготовления корпусных деталей для разного, имеющимся на предприятии, оборудования, с последующим расчетом стоимости данной детали.

Автоматизированная система расчета трудоемкости состоит из нескольких взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполняет свою функцию. Структура системы включает следующие компоненты (рис. 1):

1) модуль ввода данных: при помощи этого модуля происходит ввод данных в систему;
2) модуль подбора оборудования: этот модуль производит подбор подходящего оборудования для изготовления детали;

3) модуль расчета времени изготовления: основной модуль, который на основе введенных данных производит расчеты времени изготовления. Этот модуль использует специальные алгоритмы и модели для учета всех факторов, влияющих на трудоемкость;

4) модуль вывода данных. Интерфейс пользователя: система должна иметь удобный интерфейс для ввода и редактирования данных, а также для просмотра результатов расчетов.



Рис. 1. Структура автоматизированной системы
Fig. 1. The structure of the automated system

Далее рассмотрим каждый модуль более подробно.

Модуль ввода данных. В данном модуле пользователю необходимо ввести такие данные как: размер заготовки; марку материала; объем детали; наличие термической обработки по конструкторской документации; наличие гальванической обработки по конструкторской документации; наличие лакокрасочных покрытий по конструкторской документации; минимальный внутренний радиус скругления; максимальный допуск отклонения формы и расположения поверхностей; максимальный допуск на линейные размеры; максимальный допуск на межосевые размеры; максимальный допуск на отверстия; необходимость применения 5-ти осевого оборудования; количество деталей.

Модуль подбора оборудования. Данный модуль подбирает подходящее оборудование для изготовления детали. Для каждого из подобранных станков будет подсчитано время изготовления. Также будет предложен вариант с использованием разного оборудования для черновой, получистовой и чистовой обработки.

Модуль сравнивает данные о детали с данными об оборудовании, которые берет из таких баз данных как: ТОИР 1С, ADEM и т.д. Ниже приведена блок-схема подбора оборудования.

Модуль расчета времени изготовления детали. Это основной модуль системы, который производит расчет трудоемкости изготовления детали. Для определения трудоемкости были проанализированы данные более ста деталей изготавливаемых на производстве на разном оборудовании и получены следующие зависимости влияющие на трудоемкость изготовления:

1) время изготовления корпусных деталей на многоцелевых фрезерных станках с ЧПУ это 90 – 95 % времени механической обработки, 3 % – контрольных операций, 2 % – промывочных, 0 – 1,5 % – термических, 0 – 0,8 % – гальванических, 0 – 1,5 % – лакокрасочных операций [4];

2) время механической обработки корпусных деталей – это 90 % времени фрезерной обработки с ЧПУ, 10 % – слесарная, заготовительная операции [5].

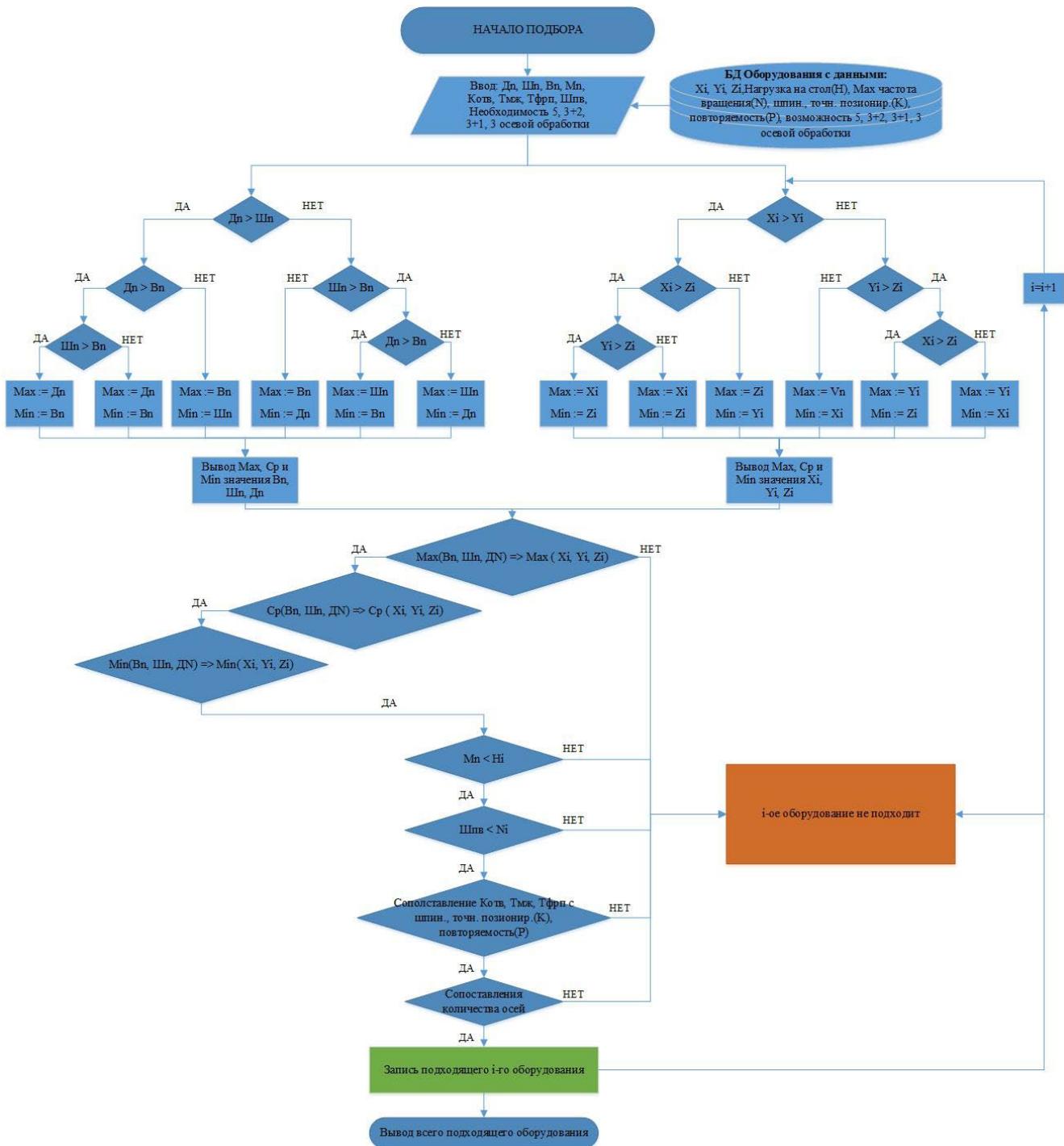


Рис. 2. Блок-схема подбора оборудования
Fig. 2. Block diagram of equipment selection

Исходя из полученных зависимостей и на основе метода определения трудоемкости по объему материала, удаленного инструментом (ОМУИ), была получена следующая формула расчета трудоемкости [6].

$$T_{\text{общ}} = T_{\text{мех.обр}} + T_{\text{гал.обр}} + T_{\text{лак.пк}} + T_{\text{тер.обр}} + T_{\text{промывка}} + T_{\text{кон.оп}} = 1,15 \cdot \left(1,08 \sum \frac{V_{\text{обр}i}}{S_{\text{инс}i} \cdot D_i \cdot h_i \cdot k_i} + \frac{0,2 \sum \frac{V_{\text{обр}i}}{S_{\text{инс}i} \cdot D_i \cdot h_i \cdot k_i}}{n} \right),$$

где $T_{\text{мех.обр}}$ – трудоемкость механической обработки, $T_{\text{гал.обр}}$ – трудоемкость гальванической обработки, $T_{\text{лак.пк}}$ – трудоемкость лакокрасочного покрытия, $T_{\text{тер.обр}}$ – трудоемкость термообра-

ботки, $T_{\text{промывка}}$ – трудоемкость операций промывка, $T_{\text{кон.оп}}$ – трудоемкость проверочных и контрольных операций, $V_{\text{обр}}$ – объем обрабатываемого материала, h – глубина резания, k – коэффициент перекрытия инструмента, D – диаметр инструмента, n – количество деталей.

Модуль вывода данных. Интерфейс пользователя. На пользовательских интерфейс выводятся данные расчета трудоемкости корпусной детали на разном оборудовании в табличном виде:

Результаты расчета трудоемкости изготовления детали
The results of calculating the complexity of manufacturing the part

Таблица 2

Table 2

Подобранные оборудование	Время изготовления на данном оборудовании, K
Станок 1	K_1
Станок 2	K_2
Станок 3	K_3
Станок i -ый	K_i

Обсуждение результатов

Результаты экспериментов показали, что внедрение автоматизированной системы расчета трудоемкости позволяет значительно сократить время на выполнение расчетов и повысить их точность. Это особенно важно в условиях мелкосерийного производства, где часто требуется переналадка оборудования и расчет новых режимов работы для каждой партии продукции.

Тем не менее, система требует доработки в плане интеграции с существующими MES, ERP-системами предприятия. На текущий момент она работает автономно и требует ручного ввода данных, что может быть оптимизировано в будущем.

Заключение

Разработка автоматизированной системы расчета трудоемкости для мелкосерийного производства показала свою эффективность. Система позволяет сократить время на выполнение расчетов на 66 %, повысить точность до 98 %.

Данная система позволяет:

- 1) автоматизировать расчет трудоемкости;
- 2) технологической службе на начальном этапе определиться с выбором оптимального оборудования;
- 3) сократить время выдачи коммерческого предложения заказчику в 2 – 3 раза;
- 4) определиться с максимально выгодным технологическим процессом изготовления детали;
- 5) повышать гибкость производства, что особенно важно для мелкосерийного производства;
- 6) при дальнейшей интеграции с ERP-системами может повысить эффективность всей производственной цепочки.

Библиографический список:

1. Юсупова С.М. Регламентация и нормирование труда: учебное пособие. – Саратов, 2015. – 147 с.
2. Далечин А.С., Феофанов А.Н. Разработка модели подсистемы автоматизированной компоновки агрегатного станка на примере корпусных деталей с целью уменьшения трудоемкости проектирования технологического оборудования // Вестник МГТУ «Станкин». – 2024. – № 1(68). – С. 159-167.

Bibliographic list:

1. Yusupova S.M. Regulation and Standardization of Labour. Saratov; 2015.
2. Dalechin A.S., Feofanov A.N. Development of the Subsystem Model of Automated Layout of Rotary Transfer Machine on the Example of Body Parts in Order to Reduce the Complexity of Designing Technological Equipment. Vestnik MSTU «Stankin». 2024;1(68): 159-167.

3. Шпандарук В.А. Анализ существующих автоматизированных систем расчета трудоемкости механообрабатывающих операций на ранних стадиях подготовки производства // Научный аспект. – 2024. – Т. 31. – № 3. – С. 3893-3898.
4. Морозов И.М., Гузеев В.И., Фадюшин С.А. Техническое нормирование операций механической обработки деталей: учебное пособие. – Челябинск, 2005. – 67 с.
5. Шпандарук В.А. Повышение качества расчета трудоемкости изготовления корпусной детали на фрезерном станке с ЧПУ по методу определения объема материала, срезаемого инструментом // СМИС-2024. Технологии управления качеством: Материалы Международной научно-технической конференции, Москва, 22–24 мая 2024 года. – Москва: Московский Политех, 2024. – С. 267-273.
6. Феофанов А.Н., Шпандарук В.А. Повышение оперативности расчета трудоемкости изготовления корпусной детали на фрезерном станке с ЧПУ по методу определения объема материала, срезаемого инструментом // Вестник МГТУ «Станкин». – 2024. – № 3 (70). – С. 122–131.
3. Shpandaruk V.A. Analysis of Existing Automated Systems for Calculating the Labour Intensity of Machining Operations at the Early Stages of Production Preparation. Scientific Aspect. 2024;31(3):3893-3898.
4. Morozov I.M., Guzeev V.I., Fadyushin S.A. Technical Regulation of Operations of Machining Parts. Chelyabinsk; 2005.
5. Shpandaruk V.A. Improving the Quality of Calculating the Complexity of Manufacturing a Body Part on a CNC Milling Machine by the Method of Determining the Volume of Material Cut by the Tool. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Quality Management Technologies SMIS-2024; 2024 May 22-24; Moscow: Moscow Polytechnic Institute: 2024. p. 267-273.
6. Feofanov A.N., Shpandaruk V.A. Increasing the Efficiency of Calculating the Labour Intensity of Manufacturing a Body Part on a CNC Milling Machine Using the Method of Determining the Volume of Material Cut by the Tool. Vestnik MSTU «Stankin». 2024;3(70): 122-131.

Информация об авторах:

Шпандарук Владислав Александрович
аспирант 4-го года обучения, Московский государственный технологический университет «Станкин».

Феофанов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная графика», Московский государственный технологический университет «Станкин».

Information about the authors:

Shpandaruk Vladislav Alexandrovich
4th year postgraduate student of Moscow State University of Technology «Stankin».

Feofanov Alexander Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Engineering Graphics of Moscow State University of Technology «Stankin».

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 22.10.2024; одобрена после рецензирования 06.11.2024; принята к публикации 19.11.2024.

The article was submitted 22.10.2024; approved after reviewing 06.11.2024; accepted for publication 19.11.2024.

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.

Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.42

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-28-35

АНАЛИЗ ВОПРОСОВ РАЗРАБОТКИ ГОЛОСОВОГО ПОМОЩНИКА ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ БИБЛИОТЕК

**Наталья Александровна Борсук¹, Данила Александрович Ковров²,
Татьяна Александровна Онуфриева³**

^{1, 2, 3} Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Россия

¹ borsuk65@yandex.ru

² KovrovDanila@qmail.com

³ onufrievata@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос об обслуживание читателей в специальных библиотеках для людей с ограничениями по зрению и о проблемах, с которыми сталкиваются такие читатели. Существующие стандартные автоматизированные системы обслуживания посетителей оказываются не полнофункциональными из-за особенностей таких людей. Предлагается разработка голосового помощника, встроенного в функционирующую в библиотеке автоматизированную систему обслуживания. Представлена модель работы приложения, учтены особенности методов перевода текстов в числовые форматы. Разработан алгоритм функционирования голосового помощника, включающий этапы авторизации и регистрации пользователя, уведомления о поступлении новых книг, формирования рекомендаций, уведомления о задолженностях. Приведена структура базы данных библиотечного фонда для слабовидящих людей со всеми связями, которые обеспечивают удобность сбора информации. Авторы проиллюстрировали реализацию основных функций приложения. Данное приложение разработано для специализированной библиотеки Н. Островского в городе Калуге для людей с ограничениями по зрению. Это позволит улучшить организацию хранения и предоставления информации, оптимизировать рабочие процессы, повысить доступность и удобство использования для пользователей с ограниченными возможностями.

Ключевые слова: библиотека для людей с ограничениями по зрению, голосовой помощник, PyCharm, Python, цифровизация

Для цитирования: Борсук Н.А. Ковров Д.А. Онуфриева Т.А. Анализ вопросов разработки голосового помощника для специализированных библиотек // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 28-35. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-28-35.

Original article

Open Access Article

ANALYSIS OF DEVELOPMENT ISSUES FOR A VOICE ASSISTANT FOR SPECIALIZED LIBRARIES

Natalia A. Borsuk¹, Danila A. Kovrov², Tatyana A. Onufrieva³

^{1, 2, 3} Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

¹ borsuk65@yandex.ru

² KovrovDanila@qmail.com

³ onufrievata@mail.ru

Abstract. The paper examines the issue of serving readers with visual impairments in specialized libraries, and the challenges these readers face. Existing standard automated customer service systems turn out to be less than fully

functional due to the population's specific needs. The work suggests developing a voice assistant integrated into the library's existing automated service system; presents an application operation model, taking into account the specific methods for converting text into numerical formats. The authors develop an algorithm for the voice assistant's operation, including the stages of user authorization and registration, notifications of new book arrivals, recommendation generation, and notifications of overdue materials; provide the structure of the library's database for visually impaired individuals, with all the relationships that ensure ease of information retrieval. The authors illustrate the implementation of the application core functions, developed for the N. Ostrovsky specialized library in the city of Kaluga, serving people with visual impairments. This will improve the organization of information storage and delivery; optimize workflows, and increase accessibility and application for users with disabilities.

Keywords: library for visually impaired people, voice assistant, PyCharm, Python, digitalization

For citation: Borsuk N.A., Kovrov D.A., Onufrieva T.A. Analysis of Development Issues for a Voice Assistant for Specialized Libraries. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 28-35. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-28-35.

Введение

Современный век – это век стремительной цифровизации всех сфер человеческой деятельности. Согласно указу Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 определены главные целевые показатели цифровой информации в России. А именно:

- достижение цифровой зрелости ключевых отраслей экономики и социальной сферы, в том числе здравоохранения и образования, а также государственного управления;
- доля массовых социально значимых услуг, доступных в электронном виде – 95 %;
- доля домохозяйств, имеющих широкополосный доступ к Интернету – 97 %;
- увеличение вложений в российские *IT*-решения в четыре раза по сравнению с их размером в 2019 году [1].

Из представленных цифр видно, что значительная доля *IT* выросла в секторе образования и в секторе социальных услуг. Рассмотрим более подробно сферу образования, а именно получение новых знаний посредством библиотек. Люди всегда тянулись к получению какой-либо информации из различных источников. В современном мире почти не осталось населенных пунктов, которые не имели бы библиотеки. По данным Главного информационно-вычислительного центра (ГИВЦ) на 1 января 2023 года количество публичных библиотек МК РФ составило 40 906 единиц.

Изначально работа с читателем в библиотеке была рутинной и довольно кропотливой. Сначала необходимо было завести карточку читателя, присвоить ей порядковый номер, выдать посетителю читательский билет, найти в довольно большой картотеке информацию об издании, которое хотел бы взять читатель, отметить в карточке читателя взятую книгу и т.д. В таком виде библиотечная система работала довольно длительное время.

Все поменялось с общей цифровизацией человеческой деятельности. В библиотеках используются информационные системы учета и работы с читателями, осуществляется оцифровка наиболее ценных книг, создается единая база электронных книг, доступ к которой может быть осуществлен в режиме 24/7 из любой точки земного шара и многое другое.

Цифровизация в библиотеках – это процесс оцифровки книг, журналов и других источников информации, а также создание мультимедийных ресурсов. Это позволяет: улучшить организацию хранения и предоставления информации, сохранить культурное наследие, многократно использовать цифровые копии, оптимизировать рабочие процессы.

Однако, когда речь идет о специальных библиотеках для людей с ограничениями по зрению и о проблемах, с которыми сталкиваются такие читатели, стандартные, автоматизированные существующие системы обслуживания посетителей оказываются не полнофункциональными из-за уникальных особенностей данного рода людей. По данным аналитического бюро информационного портала *GxP News* исследователи считают, что к 2025 году число слабовидящих в России увеличится как минимум на 5,1 %, до 6,2 млн человек [2]. Доступ к любой информации данным людям крайне необходим. Поэтому возникает задача облегчить доступ слабовидящих к библиотечному фонду.

В результате плодотворной длительной работы по автоматизации работы библиотеки для людей с ограничениями по зрению им. Н. Островского в городе Калуге создана база данных

читателей, работает каталогизация библиотечного фонда, реализована система сбора и анализа статистических данных, облегчающая труд сотрудников библиотеки, автоматизирован вход слабовидящих читателей в библиотечную систему путем считывания штрихкода на читательском билете, разработан сайт самой библиотеки.

На данном этапе возникла задача разработки голосового помощника, облегчающего вход в библиотечную систему по *ID* читателя, голосового вывода имеющихся у него на руках книг, выдачи рекомендаций по жанрам читаемых книг.

Проектирование объекта

Для достижения поставленной цели предлагается интегрировать в существующую автоматизированную систему обслуживания пользователей библиотеки голосового помощника, используя технологии распознавания и синтеза речи, а также диалоговые модели. Это позволит упростить поиск информации, предоставлять справочную поддержку и рекомендации пользователям, а также автоматизировать некоторые процессы, такие как бронирование книг и регистрация.

Разработано приложение голосового ассистента – программный комплекс, в котором основным объектом управления является информация о читателе. Модель работы приложения представляет собой сочетание существующих методов рельефно-графического управления и взаимодействия с речевыми технологиями – системами синтеза и распознавания речи.

Модель управления представлена на рис. 1, где *id* – идентификатор читателя, читательский билет, который авторизует пользователя, *u* – речевой запрос поиска, с учетом коррекции, построенной на обратной связи и аудиодискрипции.

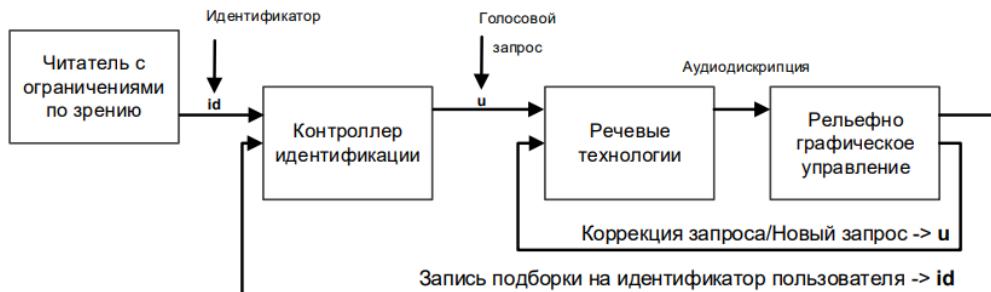


Рис. 1. Модель управления
Fig. 1. Management model

Для разработки приложения голосового ассистента (помощника) необходимо исследовать способы обеспечения доступа к информации для пользователей с ограниченными возможностями зрения, такие как технологии речи (включая синтез и распознавание) [3] и рельефное графическое управление [4]. Синтез речи позволяет преобразовывать текстовую информацию в аудиоформат, обеспечивая альтернативу тексту и предоставляя звуковую обратную связь. Технологии распознавания речи позволяют пользователю управлять приложением и выполнять поиск с помощью голосовых команд. При разработке модели распознавания человеческой речи разумнее использовать методы векторизации или обработки естественного языка *NLP*.

Обработка естественного языка, также известная как *NLP* (*Natural Language Processing*), занимается применением алгоритмов машинного обучения для работы с текстовыми данными. Как правило, модели машинного обучения преобразуют текстовую информацию в числовые представления, которые могут быть обработаны и проанализированы. [5, 6].

В процессе обработки естественного языка текстовая информация подвергается сегментации на отдельные смысловые единицы, именуемые токенами. Это могут быть буквы, слова, словосочетания, предложения, абзацы и иные текстовые элементы. Наиболее распространенным подходом является разделение текста на отдельные лексические единицы – слова. Сово-

купность всех уникальных токенов формирует словарный запас, который может быть упорядочен в алфавитном порядке. В области обработки естественного языка также используются понятия «документ» и «корпус». Документ представляет собой набор токенов, относящихся к одной смысловой единице, например, предложение, комментарий или сообщение пользователя. Корпус, в свою очередь, является совокупностью всех документов, рассматриваемых в рамках анализа.

На практике используются 4 наиболее популярных метода для перевода текстов в числовые форматы.

Прямое кодирование. Прямое кодирование (*One-Hot Encoding*) является простейшим подходом, при котором каждому уникальному слову в словаре сопоставляется бинарный вектор, где единица соответствует данному слову, а остальные элементы равны нулю. Такое представление не учитывает взаимосвязи между словами.

Bag of words. Метод мешка слов (*Bag of Words*) основан на подсчете частоты встречаемости каждого слова в документе, формируя вектор, где каждый элемент соответствует количеству вхождений конкретного слова. Данный подход игнорирует порядок слов и их семантические связи.

TF-IDF. *TF-IDF* (*Term Frequency – Inverse Document Frequency*) является развитием мешка слов, где каждому слову присваивается вес, отражающий его важность в документе с учетом распространенности в корпусе. Это позволяет выделять наиболее значимые слова.

Стоит отметить, что *TF* считается для токенов документа, тогда как *IDF* – токенов всего корпуса. Кроме того, *IDF* можно считать и другими способами, например, в *Python*-библиотеке *Scikit-learn* этот параметр гибко регулируется.

Word embeddings. Четвертый метод кодирования *word embeddings* – векторное представление слов. Векторы можно складывать, вычитать, сравнивать. Например, при сравнении близости слов «мужчина», «мальчик», «девочка», очевидно, что «мужчина» и «мальчик» стоят ближе друг к другу. Именно так и работают *word embeddings*, представляя слова (токены) в векторы. Самой распространенной реализацией векторного представления слов является *Word2vec*.

Исходя из анализа, было решено использовать метод *Word embeddings*. Метод облегчает извлечение смысла из текста и обработку семантических отношений, а также снизить размерность данных, что ускоряет обучение моделей и уменьшает потребность в вычислительных ресурсах по сравнению с другими методами обработки текста. Более того *Word embeddings* способен улавливать семантический контекст слов, что делает их более информативными и эффективными для различных задач, включая классификацию, кластеризацию и перевод текста.

Разработанная система обладает функционалом как для читателей, так и для сотрудников. Посредством голоса пользователь запрашивает выполнение программой заданных функций, программа озвучивает результаты своей работы и всю информацию, которая отображается на экране.

Помимо распознавания человеческой речи голосовой помощник для библиотечной системы имеет возможность сбора информации и предоставления её пользователю [7]. Используя подключение к базе данных, ассистент, по запросу пользователя, выводит информации о посетителе. На рис. 2 приведена структура базы данных библиотечного фонда для слабовидящих людей со всеми связями, которые обеспечивают удобство сбора информации.

Голосовой ассистент запрашивает номер читательского билета посетителя, который соответствует *id* пользователя. На основе обработанного запроса программа начинает сбор информации о пользователе из базы данных, которая будет отображена на терминале и также озвучена. При этом предоставляется только нужная информация (ФИО, дата регистрации в системе, а также последние взятые книги), ненужная информация игнорируется. Более того, при анализе формируется информация о задолженностях пользователя с соответствующим напоминанием. Такой подход облегчает работу в библиотечной системе путем оперативного сбора и предоставления необходимой информации.

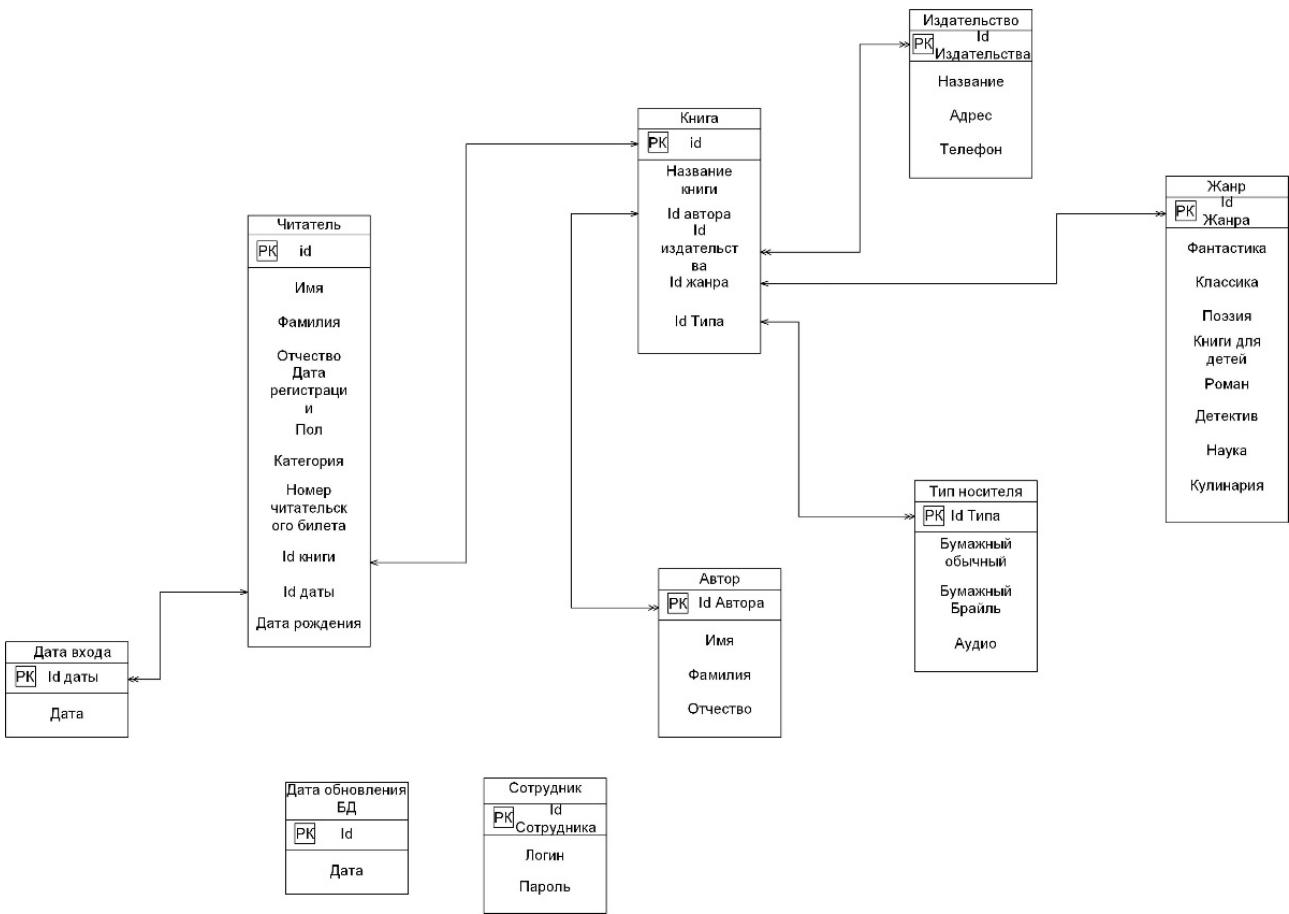


Рис. 2. Структура базы данных библиотеки для слабовидящих людей
 Fig. 2. The structure of the library database for visually impaired people

Однако если по введенной информации о номере читательского билета не было ничего найдено, или же пользователь еще не зарегистрирован в системе, программа предлагает сделать это. Запрашивая все необходимые данные, голосовой помощник уже не собирает информацию о пользователе, а заносит её в базу данных с автоматическим присвоением индивидуального *id* и номера читательского билета. Данный процесс обеспечивает быстродействие в рабочем процессе, исключая работу с картотекой.

В дополнении к сбору информации, функцией, обеспечивающей удобную работу с библиотечным фондом, является функция создания рекомендаций. Для реализации этого процесса на основе базы данных библиотеки проходит обучение нейронной сети.

Нейронной сети предоставляется информация о всех книгах, взятых пользователем за весь период с момента его регистрации в библиотечной системе. В основном для формирования рекомендаций берется информация о часто встречающихся авторах и жанрах прочитанного. На основе полученных данных нейронная сеть формирует список по популярности книг у пользователя и формирует новый список книг, которые могут заинтересовать посетителя. При создании данного списка игнорируются уже прочитанные произведения и произведения, которые меньше всего берутся другими пользователями. Кроме того, рекомендации создаются на основе типа носителя информации, который подходит посетителю. Алгоритм функционирования системы представлен на рис. 3.

Блоки 1...15: функции авторизации и регистрации пользователя, блоки 16...19: функция уведомления о поступлении новых книг, блоки 20...25: функция формирования рекомендаций, блоки 26, 27: функция уведомления о задолженностях, блок 29: конец сеанса с пользователем.

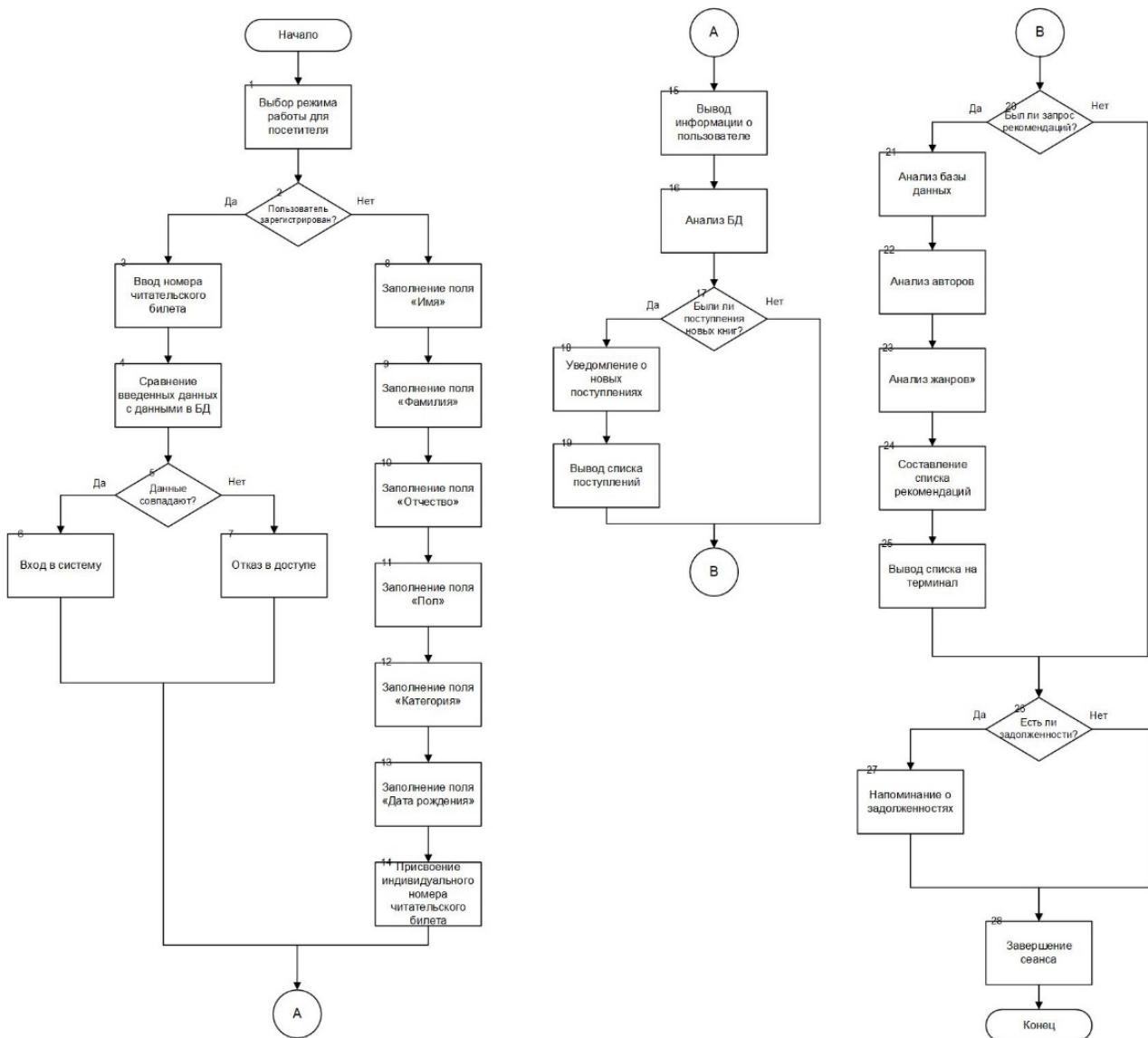


Рис. 3. The algorithm of the system functioning
 Fig. 3. The structure of the library database for visually impaired people

Примеры реализации функции распознавания и обработки речи и авторизации представлены на рис. 4, 5.

```
# Реализация ввода запросов от пользователя голосом
7 usages
def get_audio():
    r = sr.Recognizer()
    with sr.Microphone() as source:
        audio = r.listen(source)
        said = ""
    try:
        said = r.recognize_google(audio, language="ru-RU")
        print("Вы сказали:", said)
    except Exception as e:
        print("Извините, не могу распознать вашу речь")
    return said.lower()
```

Рис. 4. Код функции распознавания речи
 Fig. 4. The code of the speech recognition function

```

# Основная логика программы
speak("Привет! Зарегистрированы ли вы?")
print("Программа: Привет! Зарегистрированы ли вы?")
response = get_audio()
if "да" in response:
    speak("Назовите номер читательского билета")
    print("Назовите номер читательского билета")
    user_ticket_number = get_audio()
    sql = "SELECT * FROM users WHERE ticket_number = %s"
    mycursor.execute(sql, (user_ticket_number,))
    user = mycursor.fetchone()
    # Проверка наличия пользователя в базе данных
    if user:
        user_info = f"Имя: {user[1]}, Фамилия: {user[2]}, Дополнительная информация: {user[3]}"
        speak(user_info)
        print("Программа:", user_info)
    else:
        speak("Пользователь с таким номером читательского билета не найден.")
        print("Программа: Пользователь с таким номером читательского билета не найден.")
else:
    speak("Введите ваше имя, пожалуйста.")
    print("Программа: Введите ваше имя, пожалуйста.")
    user_name = get_audio()
    speak("Введите вашу фамилию, пожалуйста.")
    print("Программа: Введите вашу фамилию, пожалуйста.")
    user_surname = get_audio()
    speak("Введите ваше отчество, пожалуйста.")
    print("Программа: Введите ваше отчество, пожалуйста.")
    user_patronymic = get_audio()

```

Рис. 5. Код функции авторизации
Fig. 5. The code of authorization function

Помимо читателя программой могут пользоваться также сотрудники библиотеки. Благодаря функциям голосового ассистента сотрудники будут иметь возможность собирать статистику о половой принадлежности читателей, о наиболее популярных жанрах или авторах. По собранной статистике сотрудники смогут спланировать работу библиотечного фонда, исходя из предпочтений читателей.

Данная система была реализована с использованием высокоуровневого языка программирования *Python*. *Python* – это язык программирования, который отличается простотой в освоении и обширным набором библиотек, охватывающих широкий спектр задач, включая распознавание речи, синтез речи, машинное обучение, искусственный интеллект и обработку естественного языка. Более того, *Python* предоставляет богатый выбор библиотек, которые позволяют выполнять распознавание и синтез речи, а также проводить машинное обучение.

В качестве среды разработки использовался *PyCharm*. *PyCharm* – это интегрированная среда разработки (*IDE*) для языка программирования *Python*, разработанная компанией *JetBrains*. *PyCharm* является удобным редактором кода с подсветкой синтаксиса, мощными инструментами отладки, системой автодополнения кода, интеграцией с системами контроля версий, а также поддержкой различных фреймворков, что облегчает процесс разработки программы.

Как и любая информационная система, голосовой ассистент обладает перспективами развития. К таким перспективам можно отнести расширение функционала, чтобы не только посетитель, но сотрудник библиотеки мог работать с программой. Используя функционал голосового помощника, сотрудник может анализировать не только список пользователей, зарегистрированных в системе, но и формировать статистику о наиболее популярных книгах и типах носителей информации среди посетителей. Данное расширение функционала значительно оптимизирует работоспособность персонала, снижая время и силы, необходимые для выполнения даже самой простой задачи.

Заключение

Голосовой помощник – удобный инструмент для автоматизации производства. Его интеграция в библиотечные системы требует комплексного подхода, включающего разработку голосового интерфейса, оптимизацию доступности и удобства использования для пользователей с ограниченными возможностями по зрению, а также интеграцию с существующими информационными ресурсами и каталогами. Важно также уделить внимание аспектам конфиденциальности и безопасности данных при использовании голосового помощника в библиотечной среде.

Список источников:

1. <https://www.garant.ru/article/1605871>
2. <https://asi.org.ru/news/2022/11/28/issledovateli-poschitali-skolko-slabovidyashhih-i-slaboslyshashhih-lyudej-budet-v-rossii-k-2025-godu>
3. Крысин И.А., Онуфриева Т.А. Структура электронного (тифло) каталога для библиотек, в том числе специализированных // Международный научный журнал «Символ науки». – 2016. – №2-2. – 58 с.
4. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0 [Электронный ресурс] URL: <https://www.w3.org/Translations/WCAG20-ru/>
5. Паттерсон Д., Гибсон А. Глубокое обучение с точки зрения практика. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 418 с.
6. Цитульский А.М., Иванников А.В., Рогов И.С. NLP. Обработка естественных языков // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2020. – №6. – С. 467-474.
7. Каримов А.Ю. Анализ алгоритмов голосовых помощников // Международный журнал «Вестник науки». – 2019. – №5 (14). – Т. 4. – С. 492-495.

Информация об авторах:

Борсук Наталья Александровна

кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информационные системы и сети», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ковров Данила Александрович

студент 4 курса, кафедра «Информационные системы и сети», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Онуфриева Татьяна Александровна

кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информационные системы и сети», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

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 26.04.2024; одобрена после рецензирования 18.12.2024; принята к публикации 19.02.2024.

The article was submitted 26.04.2024; approved after reviewing 18.12.2024; accepted for publication 19.02.2024.

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

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

References:

1. [Internet]. Available from: <https://www.garant.ru/article/1605871>
2. [Internet]. Available from: <https://asi.org.ru/news/2022/11/28/issledovateli-poschitali-skolko-slabovidyashhih-i-slaboslyshashhih-lyudej-budet-v-rossii-k-2025-godu>
3. Krysin I.A., Onufrieva T.A. Structure of the Electronic (Typhlo) Catalog for Libraries, Including Specialized Ones. Symbol of Science: International Scientific Journal. 2016;2:2:58.
4. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0 [Internet]. Available from: <https://www.w3.org/Translations/WCAG20-ru/>
5. Patterson D., Gibson A. Deep Learning. A Practitioner's Approach. Moscow: DMK Press; 2018.
6. Tsitulsky A.M., Ivannikov A.V., Rogov I.S. NLP. Natural Language Processing. StudNet. 2020;6:467-474.
7. Karimov A.Yu. Analysis of Voice Assistant Algorithms. Science Bulletin. 2019;5(14)-4:492-495.

Information about the authors:

Borsuk Natalia Alexandrovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Networks of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)

Kovrov Danila Alexandrovich

4th year student at the Department of Information Systems and Networks of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)

Onufrieva Tatyana Alexandrovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Networks of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)

Управление в организационных системах

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 544.35; 621.9.048.7

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-36-43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА КРИТЕРИЕВ ЭКСПЕРТНОГО РЕЙТИНГОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Александр Александрович Барзов¹, Вера Михайловна Корнеева^{2✉},

Александр Николаевич Феофанов³, Иван Сергеевич Корнеев⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

^{2,4} Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

³ Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва, Россия

¹a.a.barzov@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0009-3687-5961>

²v_korneeva@list, <http://orcid.org/0009-0004-5214-1849>

³feo.fanov.fan@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-4761-0538>

⁴iskorn@icloud.com, <http://orcid.org/0009-0005-0243-3170>

Аннотация. Целью работы является определение функциональной связи между качеством процедуры рейтингования трудноформализуемых объектов анализа (ТОА), к которым относятся инновационные предложения информационно-технологического профиля, и числом используемых для этого оценочных критерии. Причем содержание данных критерии рассматривается как необходимое условие результативности процедуры рейтингования ТОА, а их формализовано-обоснованное количество представляет собой достаточное условие для её эффективного выполнения. Задачи работы состоят в моделировании вероятностной достоверности процедуры критериально-экспертного оценивания (КЭО) предиктивного рейтинга ТОА и выявления взаимосвязей между ее идентификационными параметрами. При этом данную алгоритмизированную процедуру КЭО различных ТОА, к которым относится предиктивное качество инноваций, следует рассматривать как значимое слагаемое современных информационных технологий, в которых всё шире используются функционально-кreatивные возможности нейросетей. Это положение представляет собой основную перспективу развития, предлагающего в статье квадиметрического подхода к рейтингованию ТОА. Методы исследования основаны на аппарате прикладной квадиметрии ТОА и теории надежности сложных систем. Это обеспечило возможность получения аналитическим путём соотношения между совокупностью, условных ковариаций единичных количественных значений критерии оценивания и коэффициентов их влияния на итоговый рейтинг ТОА, например, прогнозируемый уровень потенциала результативности реализации конкретного информационно-технологического предложения. Новым основным результатом исследования является определение функциональной зависимости вероятностной достоверности процедуры рейтингования от информационности используемых оценочных критерии и их общего числа. Полученное общее вероятностное соотношение позволило связать в единый функционально-вероятностный комплекс прогнозируемого достоверность процедуры КЭО с информационной содержательностью применяемых оценочных критерии и их общим числом. С использованием принципа Парето данное соотношение преобразовано в расчетную зависимость, по которой реалистично определение конкретного числа оценочных критерии в зависимости только от требования к их надежности – вероятности адекватного представления соответствующей характеристики качества рейтингуемого ТОА. Приведены типовые примеры расчета достаточного числа оценочных критерии при различном уровне требований к их содержательной адекватности. Это позволяет количественно формализовать структуру рейтингования ТОА, к которой относятся различные инновации информационно-технологического содержания.

Ключевые слова: рейтинг, экспертиза, оценивание, число критерии, вероятностная модель, функциональная связь, достоверность

Для цитирования: Барзов А.А., Корнеева В.М., Феофанов А.Н., Корнеев И.С. Определение числа критерии экспертного рейтингования объектов анализа информационно-технологического профиля // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 36-43. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-36-43.

DETERMINING THE NUMBER OF CRITERIA FOR EXPERT RATING OF ANALYSIS OBJECTS OF INFORMATION TECHNOLOGY PROFILE

Alexander A. Barzov¹, Vera M. Korneeva^{2✉}, Alexander N. Feofanov³, Ivan S. Korneev⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^{2, 4} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Technology «Stankin», Moscow, Russia

¹a.a.barzov@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0009-3687-5961>

²v_korneeva@list, <http://orcid.org/0009-0004-5214-1849>

³feo.fan.fan@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0003-4761-0538>

⁴iskorn@icloud.com, <http://orcid.org/0009-0005-0243-3170>

Abstract. The aim of this work is to determine the functional relationship between the quality of the rating procedure for difficult-to-formalize objects of analysis (DFOAs), which include innovative information technology proposals, and the number of evaluation criteria used. The authors consider the content of these criteria as a necessary condition for the effectiveness of the DFOA rating procedure, while their formalized and justified quantity constitutes a sufficient condition for its efficient execution. The objectives of the study include modelling the probabilistic reliability of the criteria-expert evaluation (CEE) procedure for the predictive rating of DFOAs and identifying the interrelationships between its identification parameters. Furthermore, the authors consider this algorithmized CEE procedure for various DFOAs, which include the predictive quality of innovations, a significant component of modern information technologies, where the functionally creative capabilities of neural networks are increasingly used. This is the main perspective for developing the qualimetric approach to DFOA rating proposed in the article. The research methods are based on the apparatus of applied qualimetry of DFOAs and the theory of complex system reliability. This enabled the analytical derivation of a relationship between the set of conditional covariances of individual quantitative values of the evaluation criteria and the coefficients of their influence on the final DFOA rating, such as the predicted level of potential effectiveness of a specific innovative technological proposal. The key new result of the research is determining the functional dependence of the probabilistic reliability of the rating procedure on the information content of the evaluation criteria used and their total number. The resulting general probabilistic relationship made it possible to link the predicted reliability of the CEE procedure with the informational content of the applied evaluation criteria and their total number into a unified functional-probabilistic complex. Using the Pareto principle, this relationship is transformed into a calculation dependency, according to which it is realistic to determine a specific number of evaluation criteria depending only on the requirement for their reliability, namely the probability of an adequate representation of the corresponding quality characteristic of the rated DFOA. The paper provides typical examples for calculating the sufficient number of evaluation criteria at various levels of requirements for their content adequacy. This allows for quantitative formalization of the DFOA rating structure, which includes various innovations of information technology content.

Keywords: rating, expertise, evaluation, number of criteria, probabilistic model, functional relationship, reliability

For citation: Barzov A.A., Korneeva V.M., Feofanov A.N., Korneev I.S. Determining the Number of Criteria for Expert Rating of Analysis Objects of Information Technology Profile. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 36-43. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-36-43.

Введение

Значимым резервом обеспечения результативности использования на практике различных предложений, в том числе в сфере бурно развивающейся информационно-технологической инноватики, является их рейтингование по критерию потенциала ожидаемого качества. Учитывая характеристические особенности данного ТОА в виде тематически профильного инновационного предложения, необходимо использовать адекватно этому обстоятельству соответствующий аппарат исследования. Таким аппаратом является прикладная квалиметрия и, в частности, метод критериально-экспертного оценивания (КЭО), потенциал функциональных возможностей которого рассматривается в ряде работ [1 – 7].

Поэтому совершенствование КЭО как инструментария прогнозирования и идентификации функционального качества инноваций, на самых ранних, допроектных этапах их жизненного цикла, представляет собой актуальную многопрофильную проблему, особенно значимую

для интенсивно развивающихся отраслей науки, к которым относятся информационные технологии в широком понимании этого термина.

Для обеспечения качества самой процедуры КЭО рейтинга различных инноваций, помимо содержательного оформления оценочных критериев и идентификации уровня их индивидуального влияния на рейтинг ТОА необходимо определение числа данных критериев. Поэтому существенно адекватное содержание критериев представляет собой необходимое условие успеха рейтингования ожидаемого качества инноваций, а их количество – достаточное условие эффективного осуществления данной процедуры. Однако весьма квадратически актуальная задача формализованного обоснования числа оценочных критериев ранее подробно с единых методических позиций не рассматривалось, и ее решение носило, в основном, рекомендательный характер [8, 9].

Учитывая параметрически многофакторный характер рассматриваемой задачи и функциональные особенности ТОА в виде инноваций информационно-технологического профиля, необходимо использовать для ее решения вероятностный подход. Этот подход достаточно универсален и обладает требуемой адаптационной гибкостью при описании самых различных ТОА.

Таким образом, разработка вероятностного подхода к определению числа критериев, по которым реализуется прогнозирование рейтинга инноваций и пример его реализации, имеют научно-прикладное значение во многих сферах новой техники и прогрессивных технологий.

Модели и методы вероятностного моделирования процедуры критериально-экспертного оценивания

Для конкретизации решаемой задачи получим аналитическое выражение рейтинга, как функция от числа оценочных критериев и их значимости. Для этого представим ошибку рейтингования в следующем виде:

$$\Delta R = R_T - R = \sum_{i=1}^n \alpha_i (r_{Ti} - r_i), \quad (1)$$

где ΔR – суммарная погрешность процедуры КЭО, обусловленная рассогласованием между неким априори неизвестным номинально точным значением рейтинга R_T для ТОА и его реальной величиной R , сформированной по результатам опроса экспертов; r_{Ti} и r_i – соответственно, номинально точные оценки i -го критерия (параметра), характеризующего R_T и реальные экспертные оценки критериев, определяющих R ; $\alpha_i = \partial R_T / \partial r_{Ti}$ – коэффициенты влияния единичных погрешностей определения характеристических критериев r_{Ti} на величину R_T ; $i = 1, 2, \dots, n$ – общее число критериев экспертного оценивания, определение которого является целью данной работы.

Следует подчеркнуть, что в технике зависимость вида (1) широко используется при анализе влияния погрешности изготовления вида: $\Delta r = r_T - r$ на точность изготовления детали и носит название уравнения операционных погрешностей. Фактически, (1) является линеаризацией функции $R_T (r_{Ti})$ путем ее разложения в ряд Тейлора, причем выражения в скобках в данном случае представляют собой первичные погрешности процедуры КЭО.

Считая, что структура R_T и R функционально идентична и представляет собой аддитивно-ковариантную комбинацию коэффициентов влияния и соответствующих оценочных критериев из (1) окончательно получим:

$$R = \sum_{i=1}^n \alpha_i r_i, \quad (2)$$

где R – рейтинговая оценка уровня (потенциала) ожидаемого качества ТОА, в частности рассматриваемого инновационного предложения; r_i – значение i -го критерия ожидаемого качества конкретного ТОА, полученное путем КЭО; α_i – численные значения i -го коэффициента влияния соответствующего i -го оценочного критерия на рейтинг конкретного ТОА; $i = 1, \dots, n$ – общее число критериев оценивания, формирующих R .

Следует подчеркнуть, что полученное соотношение (2) широко применяется в прикладной квадратике и оно известно, как эмпирическая формализация обобщенной оценки мнений

экспертов методом взвешенной суммы [1 – 7].

Таким образом, для реализации на практике процедуры КЭО различных ТОА, к которым относятся инновации информационно-технологического профиля, помимо определения содержания оценочных критериев и степени их влияния на рейтинг, необходимо каким-либо способом обосновать общее число этих критериев. Это обстоятельство представляет собой достаточное условие результативности процедуры КЭО в целом.

Для определенности последующих рассуждений предположим, что информационный вклад каждого из оценочных критериев, характеризующих рейтинг рассматриваемого ТОА, также как и их значимость, примерно одинаковы и в вероятностном выражении составляют значение p . Это допущение соответствует известному принципу равных влияний, что в данном случае косвенно должно свидетельствовать о правильности формирования элементов совокупности используемых оценочных критериев.

Тогда, итоговая вероятностная оценка достоверности результата КЭО согласно положениям теории надёжности сложных систем [10] составит:

$$P = 1 - (1 - p)^n, \quad (3)$$

где P – вероятность достоверного определения рейтинга ТОА; p – вероятность, определяющая вклад отдельного оценочного критерия и его коэффициента влияния в определяемую характеристику ТОА, например, его рейтинг; n – общее число оценочных критериев примерно одинаковой значимости, которое необходимо определить.

Фактически (3) отражает вероятностно-независимый вклад каждого оценочного критерия в общий результат оценивания определяемый согласно (2), а структурная схема, соответствующая (3), представляет собой хорошо известную в теории надежности схему параллельного (одновременного) взаимодействия единичных функциональных элементов [9].

Используя аппарат анализа проявлений масштабного фактора в такой системе, подробно рассмотренный в работе [11], не сложно показать справедливость вероятностно-экспоненциального соотношения вида:

$$P = 1 - \exp(-Cn), \quad (4)$$

где P – итоговая вероятностная оценка какой-либо значимо-доминантной характеристики или их комплекса, например рейтинга ОА, полученная по результатам КЭО; C – параметр, в обобщенном виде ответственный за качество самого процесса КЭО, и фактически определяющий осредненную «концентрацию» ошибочных или недостаточно информационно-качественных оценочных критериев и суждений о них экспертов в ходе реализации процедуры оценивания; n – общее число критериев, по которым происходит функционально-характеристическое оценивание или рейтингование конкретного ТОА.

Из совместного рассмотрения (3) и (4) не сложно получить функциональную связь между двумя основными параметрами, характеризующими качество самой процедуры КЭО:

$$C = -\ln(1 - p). \quad (5)$$

Из (5) следует, что осредненная «ошибочность» в формировании функционально-необходимой совокупности оценочных критериев практически не зависит от их количества, а определяется только информационным качеством данных критериев, т.е. значением p , фактически ответственным за характеристическую достоверность отдельного критерия оценивания. Принципиальная сложность дальнейшего решения поставленной задачи по определению рационального числа оценочных критериев n состоит в квалиметрически сущностной неопределенности значений P в (3) или (4).

Для снятия этой неопределенности положим, что имеется некоторая латентная зависимость между вероятностью итоговой достоверной оценки рейтинга ТОА P и количеством оценочных критериев n , которую, например, для (4) можно выразить как:

$$k_p \cdot P = 1 - \exp(-k_n \cdot C \cdot n), \quad (6)$$

где k_p и k_n – соответственно коэффициенты, характеризующие неявную связь между числом используемых критериев вероятностного оценивания рейтинга ТОА и достоверности (надежности) получаемого результата. Таким образом, зная численные значения k_p и k_n , соотношение типа (3) и (4) представляет собой систему, содержащую два неизвестных параметра: n и C , так как $k_p \cdot P$, по сути, представляет собой требуемую количественную оценку достоверности процедуры КЭО в целом.

Результаты

Приведем пример численного определения значения n , основываясь на выше сформулированных зависимостях. Для этого воспользуемся известным принципом Парето, который для нашего случая трактуется следующим образом: 20 % оценочных критериев от их общего, априори неизвестного числа « n » обеспечивает 80-ти процентную достоверность определения рейтинга ТОА, в частности, в виде вероятностного уровня потенциала качества планируемой к реализации инновации [12]. Это мнемоническое правило предиктивного анализа, позволяет снять неопределенность уровня P и представить, например, (3) в виде:

$$0,8 = 1 - (1 - p)^{0,2n}. \quad (7)$$

В данном соотношении согласно принципу Парето учтено, что $k_p = 0,8$; $k_n = 0,2$. По аналогии с (7) можно записать экспоненциальное соотношение (4) как:

$$0,8 = 1 - \exp(-0,2 Cn). \quad (8)$$

Далее, осуществив тривиальную процедуру овертизации (от английского *overt* – выявление) значения n путем совместного решения выше представленных уравнений, получим искомое соотношение в виде:

$$n = -8,0/\ln(1 - p), \quad (9)$$

где n – число критериев предиктивного оценивания рейтинга ТОА, например, инновационного предложения информационно-технологического профиля; p – вероятностное значение уровня информационного качества самого оценочного критерия.

Таким образом, согласно (9) число критериев оценивания n рейтинга ТОА по зависимости (2) определяется целочисленным округлением n , вычисляемого по данному соотношению. Причем, чем выше требование к вероятностной достоверности оценочных критериев, т.е. к величине p , тем необходимо использовать их большее число. Например, при $p = 0,3$, $n = 22$, а при $p = 0,5$ значение n существенно меньше и составляет: $n = 11$. Данный во многом условный пример, тем не менее позволяет утверждать, что имеется реальная возможность достаточно успешно рейтингования путем КЭО при относительно низких требованиях к информационному качеству оценочных критериев. Причем конкретные вероятностные оценки информационно-функционального качества самих критериев рейтингования в будущем весьма результативно соотнести между собой также путем их адаптированного КЭО по известной шкале градаций оценок Харрингтона [13].

Для расширения функциональных возможностей предлагаемого вероятностного подхода к определению рационального числа оценочных критериев при реализации соответствующей методики КЭО, как одной из базовых процедур в арсенале информационных технологий предиктивной квалиметрии, исходное соотношение (3) представим в более общем виде следующим образом:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (10)$$

где P – вероятность достоверной оценки рейтинга, характеризующего рассматриваемый ТОА, например ожидаемое качество рассматриваемой инновации информационно-технологического профиля; p_i – вероятностная оценка значимости i -ого оценочного критерия r_i , т.е. наиболее реалистичная величина нормированного вероятностного вклада данного критерия с учётом коэффициента влияния α_i в итоговое значение рейтинга R , характеризуемого также в нормированном виде величиной P ; $i=1, 2 \dots n$ – общее число используемых оценочных критериев.

С позиций прикладной теории надёжности сложных систем [10] выражение в круглых скобках (10) представляет собой фактически вероятность «отказа» i -ого единичного критерия, т.е. малую и, как следствие, не очень высокую эффективность его практического применения:

$$q_i = 1 - p_i, \quad (11)$$

где q_i – вероятностная мера недостаточной значимости i -ого оценочного критерия, т.е. фактически его коэффициент влияния α_i существенно нивелирует любую позитивную оценку экспертами самого критерия r_i .

Считая q_i независимыми между собой событиями, вероятность непоявления, т.е. отсутствия данного отдельного в целом неэффективного критерия в рассматриваемом массиве из i -ого числа возможных «критериальных» отказов, эту вероятность обозначим как: $q_i = P(i)$. Тогда отсутствие такого отказа при рассмотрении $(i + j)$ критериев будет составлять значение: $q_{i+j} = P(i + j)$. Далее, используя феноменологию формализации роли масштабного фактора [10] в виде соответствующего экспоненциального соотношения типа (4), не сложно показать, что в рамках принятых допущений будет справедлива следующая функциональная зависимость:

$$P_n = 1 - Q_n = 1 - \prod_{i=1}^n [\exp(-ci)], \quad (12)$$

где Q_n – обобщенная вероятностная оценка недостаточной эффективности применяемой совокупности функционально-вариативных оценочных критериев; c – параметр, ответственный за характер проявления своеобразных «отказов» в системе критериального оценивания рейтинга, величина которого фактически обратно-пропорциональна частоте (концентрации) их возникновения в используемом массиве критериев; $i=1, 2 \dots n$ – общее число используемых оценочных критериев.

После преобразования (12) с использованием известного количественного значения суммы арифметической прогрессии, получим:

$$P(n) = 1 - \exp \{-c[n + n(n - 1)/2]\}. \quad (13)$$

Данное базовое соотношение связывает в единый функциональный комплекс качество предварительно обоснованных используемых критериев: параметр c – «концентраций» недостаточно эффективных критериев с их общим количеством n , необходимым для итоговой оценки путём КЭА, рассматриваемой характеристики ТОА, например предиктивного рейтинга инновации информационно-технологического профиля. Причём, эта необходимая достаточность числа критериев обусловлена наперед заданными требуемым уровнем достоверности процедуры КЭО в целом, т.е. величиной $P(n)$ в (13).

Несмотря на свою функциональную простоту экспоненциальное соотношении вида (13) по сути представляет собой вполне реалистичную вероятностную модель связи количественных показателей процедуры КЭО с её предиктивным качеством, в первую очередь с достоверностью (надёжностью) получения соответствующих прогнозистических оценок. Причём, полученная при достаточно общих допущениях исходная зависимость (12), представляет в данном случае собой формализацию роли масштабного фактора. Эта формализация состоит в описа-

нии кинетики трансформации количества оценочных параметров в их функциональное качество – достоверность вероятностного прогноза итогового результата КЭО, как правило, во многом информационно-дефицитной задачи, сформулированной в рамках предиктивно-нелинейной квалиметрии.

Основное следствие вышеприведенных рассуждений, по выявлению функциональной зависимости уровня достоверности прогнозирования с адекватной содержательностью и количеством используемых для этого оценочных параметров (критериев) можно сформулировать в виде соответствующего утверждения. Это утверждение состоит в следующем:

Необходимость повышения предиктивно-функционального качества, т.е. достоверности или надёжности процедуры прогнозирования путем КЭО требует нелинейного увеличения количества исходных параметров (критериев), используемых в процессе оценивания. Или линейное увеличение числа оценочных критериев сопровождается нелинейно-затухающим характером увеличения (приращения) достоверности прогнозирования, основанного на этих критериях. Поэтому для формирования более достоверных оценочных суждений о различных трудноформализуемых информационных категориях типа предиктивного качества разнопрофильных инноваций, в первую очередь, структуро-вариативного информационно-технологического профиля, основное внимание необходимо уделять формированию совокупности массива сущностно адекватных критериев.

Заметим, что известный принцип Парето фактически подтверждает справедливость выше сформулированного утверждения.

В заключении отметим, что выше предложенный вероятностный подход к решению важной квалиметрической задачи можно развить в нескольких направлениях, в частности, путем анализа более реалистичных уточнений информационности оценочных критериев, а также применения аппарата имитационного моделирования для построения соответствующей методики рейтингования ТОА с последующим созданием нейросетей эксперто-аналитической направленности.

Список источников:

1. Квалиметрия в машиностроении / Р.М. Хвастунов, А.Н. Феофанов и др. – М.: Изд-во «Экзамен», 2008. – 278 с.
2. Хвастунов Р.М., Корнеева В.М., Феофанов А.Н. Сущность и возможности квалиметрического анализа // Стандарты и качество. – 2007. – №9. – С. 70-73.
3. Экспертные методы оценки в квалиметрии машиностроения / Р.М. Хвастунов, О.И. Ягелло и др. М.: АНО «ТехноНефтегаз», 2002. – 142 с.
4. Барзов А.А., Корнеева В.М., Корнеев С.С. Экспертное обоснование применения ультраструйного способа определения дефектности структуры неоднородных материалов // Сварочное производство. – 2022. – № 2. – С. 55-60.
5. Вероятностное моделирование процедуры эксперто-аналитического анализа качества инноваций // А.А. Барзов, В.М. Корнеева и др. // Технология машиностроения. – 2018. – №10 (196). – С. 63-69.
6. Андрианов Ю.М., Субетто А.И. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении. – Ленинград: Машиностроение, 1990. – 225 с.
7. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. – М.: Патент, 1996. – 271 с.
8. Феофанов А.Н., Гришина Т.Г., Шохрина Н.В. Анализ экспертных оценок в механизмах назначения приоритетных технических характеристик изделий // Технология машиностроения. – 2016. – №8 (170). – С. 63-66.

References:

1. Khvastunov R.M., Feofanov A.N., et al. Qualimetry in Engineering. Moscow: Examen Publishing House; 2008.
2. Khvastunov R.M., Korneeva V.M., Feofanov A.N. The Essence and Features of Qualimetric Analysis. Standards and Quality. 2007;9:70-73.
3. Khvastunov R.M., Yagello O.I., et al. Expert Methods of Assessment in Qualimetry of Mechanical Engineering. Moscow: ANO Tekhnoneftegaz; 2002.
4. Barzov A.A., Korneeva V.M., Korneev S.S. Expert Justification of the Effectiveness of the Application of the Ultra-Jet Method of Express Determination of the Defect Structure of Heterogeneous Materials. Welding Production. 2022;2:55-60.
5. Barzov AA, Korneeva VM, et al. Probabilistic Modelling of the Procedure for Expert-Analytical Analysis of the Quality of Innovations. Technology of Mechanical Engineering. 2018;10 (196):63-69.
6. Andrianov Yu.M., Subetto A.I. Qualimetry in Instrument Making and Mechanical Engineering. Leningrad: Mechanical Engineering; 1990.
7. Litvak B.G. Expert Assessments and Decision-Making. Moscow: Patent; 1996.
8. Feofanov A.N., Grishina T.G., Shokhrina N.V. Analysis of Expert Assessments in the Mechanisms for Assigning Priority Technical Characteristics of Products. Technology of Mechanical Engineering. 2016;8(170):63-66.

9. Кини Р.А., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
10. Половко А.М., Гуров С.В. Основные теории надежности. Практикум. 2-е изд., перераб. и доп., Санкт-Петербург.: БХВ- Петербург, 2006. – 704 с.
11. Масштабный фактор / А.А. Барзов, А.И. Денчик и др. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, 2022. – 226 с.
12. Барзов А.А., Корнеева В.М., Корнеев С.С. Вероятностное моделирование функциональной вариативности диаграммы Парето на основе анализа масштабного фактора // Качество и жизнь. – 2021. – №4 (32). – С.16-21.
13. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. – 2012. – №1 (1). – С. 25-28.
9. Keeney R.A., Raifa H. Decisions With Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, trans. Moscow: Radio I Svyaz'; 1981.
10. Polovko A.M., Gurov S.V. Fundamentals of Reliability Theory. 2nd ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2006.
11. Barzov AA, Denchik AI, et al. Scale Factor. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics; 2022.
12. Barzov A.A., Korneeva V.M., Korneev S.S. Probabilistic Modelling of the Functional Variability of the Pareto Chart Based on the Analysis of the Scale Factor. Quality and Life. 2021;4(32):16-21.
13. Pichkalev A.V. Generalized Harrington's Desirability Function for the Comparative Analysis of Technical Facilities. The Research of the Science City. 2012;1(1):25-28.

Информация об авторах:

Барзов Александр Александрович

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Центра гидрофизических исследований Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Корнеева Вера Михайловна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана, президент отделения «Квалиметрия» МОО «Академия проблем качества»

Феофанов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры АСОИ и У МГТУ «СТАНКИН», вице президент отделения «Квалиметрия» МОО «Академия проблем качества»

Корнеев Иван Сергеевич

студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Вклад авторов: Барзов А.А. – 30 %; Корнеева В.М. – 30 %; Феофанов А.Н. – 30 %; Корнеев И.С. – 10 %

Contribution of the authors: Barzov A.A. – 30 %, Korneeva V.M. – 30 %, Feofanov A.N. – 30 %, Korneev I.S. – 10 %.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.12.2024.; одобрена после рецензирования 21.01.2025; принята к публикации 10.02.2025.

The article was submitted 16.12.2024.; approved after reviewing 21.01.2025; accepted for publication 10.02.2025.

Рецензент – Медведев Д.М., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Medvedev D.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Information about the authors:

Barzov Alexander Alexandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Centre for Hydrophysical Research of the Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University.

Korneeva Vera Mikhailovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Metrology and Interchangeability of Bauman Moscow State Technical University, President of the Qualimetry Department of the International Public Organization Academy of Quality Problems

Feofanov Alexander Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Automated Information Processing and Management Systems of Moscow State University of Technology «STANKIN», Vice President at the Qualimetry Department of the Interregional Public Organization the Academy of Quality Problems

Korneev Ivan Sergeevich

Student at the Department of Rocket and Space Engineering Technologies of Bauman Moscow State Technical University

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.94

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-44-51

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ГРУППОВОГО ОБУЧЕНИЯ С УЧЁТОМ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Валерий Владимирович Меньших¹, Анна Викторовна Подольских²✉

^{1, 2} Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия

¹ menshikh@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9235-4997>

² podolskikhanna@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0003-0223-867X>

Аннотация. Рассмотрены вопросы математического моделирования процессов группового обучения специалистов для совместных действий, что является востребованным при возникновении чрезвычайных обстоятельств. Оперативность обучения группы специалистов в этих условиях является ключевым фактором повышения эффективности функционирования всей группы. Поэтому в качестве основного критерия выбрано общее время совместной подготовки группы специалистов. С этой целью разработана модель оценки длительности группового обучения, в которой учитываются ресурсные ограничения, имеющиеся у образовательных организаций, которые потенциально могут осуществлять групповое обучение специалистов. Модель включает в себя следующие этапы: определение состава компетенций в процессе подготовки (переподготовки) группы специалистов, определение состава курсов обучения группы специалистов и выбор образовательной организации для обеспечения подготовки группы за минимальное время. Статья также содержит численный пример, иллюстрирующий использование разработанной модели на примере подготовки условной группы из двух специалистов, имеющих различные начальные и различные требуемые компетенции. В примере рассматриваются три образовательные организации, в которых потенциально возможно подготовка (переподготовка) группы специалистов, и осуществляется выбор образовательной организации в соответствии с разработанной моделью.

Ключевые слова: групповое обучение, уровни компетенций, образовательная организация, гиперграф, рёберный граф, курсы обучения, ограничение ресурсов, длительность подготовки (переподготовки)

Для цитирования: Меньших В.В., Подольских А.В. Модель оценки длительности группового обучения с учётом ресурсных ограничений организаций // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 44-51. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-44-51.

Original article

Open Access Article

MODEL FOR ESTIMATING THE DURATION OF GROUP TRAINING CONSIDERING ORGANIZATIONAL RESOURCE CONSTRAINTS

Valery V. Menshikh¹, Anna V. Podolskikh²✉

^{1, 2} The Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Voronezh, Russia

¹ menshikh@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9235-4997>

² podolskikhanna@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0003-0223-867X>

Abstract. The article considers the issues of mathematical modelling of the processes of specialists' group training for joint actions, which is in demand in emergencies. The efficiency of training a specialists' group in these conditions is a key factor in increasing the entire group efficiency. Therefore, the authors choose the total time of joint training of a specialists' group as the main criterion. For this purpose, they develop a model for assessing the group training duration, which takes into account the resource constraints of educational organizations that can potentially carry out specialists' group trainings. The model includes the following stages: determining the competencies in the process of training (re-training) a specialists' group, determining training courses for a specialists' group, and selecting an educational organization to ensure training a group in the minimum time. The article also contains a numerical example illustrating the application of the developed model using the example of training a conditional group of two specialists with different initial and different required competencies. The example considers three educational organizations in which training

(retraining) a specialists' group is potentially possible, and the educational organization is selected in accordance with the developed model.

Keywords: group learning, competency levels, educational organization, hypergraph, edge graph, training courses, resource constraints, training (retraining) duration

For citation: Menshikh V.V., Podolskikh A.V. Model for Estimating the Duration of Group Training Considering Organizational Resource Constraints. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 44-51. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-44-51.

Введение

В условиях чрезвычайных обстоятельств подготовка квалифицированных специалистов становится ключевым аспектом обеспечения безопасности и спасения жизней [1]. В мире, где стихийные бедствия, террористические акты и другие угрозы становятся всё более частыми, уровень профессионализма и готовности специалистов играет значительную роль в смягчении последствий и защите населения [2]. Это во многом определяется разнообразием условий возникновения чрезвычайных обстоятельств [3], обуславливающих необходимость своевременного реагирования на новые вызовы, и, в то же время, требует гибкой организации процесса подготовки специалистов к действиям при возникновении чрезвычайных обстоятельствах, обеспечивающей возможность их адаптации к факторам, определяющим параметры оперативной обстановки в зоне чрезвычайного обстоятельства [4].

Наиболее эффективным является использование групп специалистов разного профиля для совместных действий в чрезвычайных обстоятельствах, что позволяет более результивно реагировать на возникающие вызовы [1]. При этом компетенции специалистов [5, 6] в группе могут как пересекаться, так и быть уникальными, а также специалисты могут обладать какой-либо компетенцией в разной степени [7]. Подготовка (переподготовка) специалистов может осуществляться, как правило на базе нескольких образовательных организаций, которые обладают различным ресурсом и могут обеспечивать учебный процесс по различным наборам учебных курсов.

В связи с тем, что часто требуется оперативная подготовка (переподготовка) специалистов к действиям при возникновении чрезвычайных обстоятельств, возникает задача минимизации времени группового обучения специалистов на основе выбора образовательной организации, которая могла бы это обеспечить.

Решение общей задачи минимизации разбивается на следующие частные задачи:

- 1) определение состава компетенций, получение которых должно осуществляться в процессе подготовки (переподготовки) специалистов;
- 2) определение состава курсов обучения специалистов;
- 3) выбор образовательной организации, которая может обеспечить подготовку группы за минимальное время.

Указанные частные задачи частично решались в [8 – 11]. Однако в этих публикациях не учитывались ресурсные ограничения организаций, что существенно влияет на результат выбора наиболее подходящей образовательной организации.

Определение состава необходимых компетенций специалистов

В рамках данной работы будем использовать следующую классификацию уровней владения специалистами каждой компетенцией k_s , включающую [5]:

- 1) начальный уровень $k_{s.1}$ – базовые навыки и знания, необходимые для выполнения задач на начальном этапе;
- 2) средний уровень $k_{s.2}$ – более сложные навыки и знания, требующие определённого опыта и профессиональной подготовки;
- 3) высокий уровень $k_{s.3}$ – углублённые экспертные навыки и знания, необходимые для решения сложных задач и достижения высоких результатов.

При организации процесса обучения специалистов следует учитывать логические взаимосвязи между уровнями компетенций, которые можно описать с использованием ориентированного ациклического графа [6 – 9], пример которого приведён на рис. 1 (k_0 означает отсутствие компетенции).

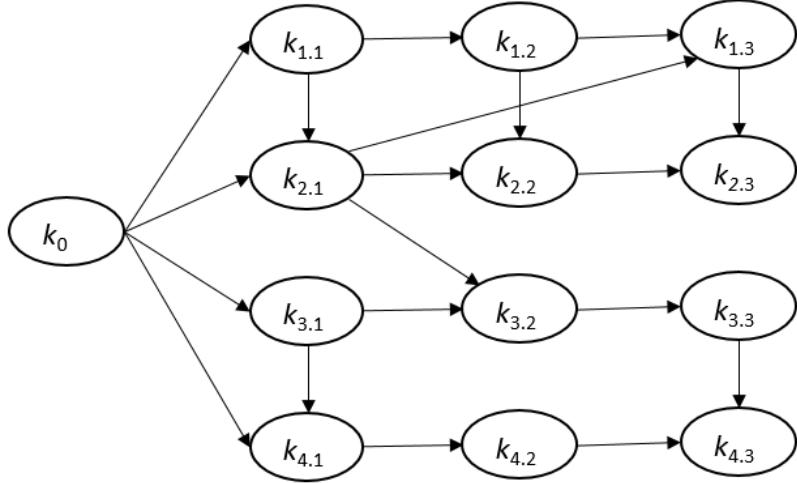


Рис. 1. Пример графа взаимосвязей между уровнями компетенций
Fig. 1. An example of a graph of relationships between levels of competence

Для получения нового уровня $k_{s,l}$ какой-либо компетенции может оказаться необходимым владение сразу несколькими уровнями $k_{s,1}, \dots, k_{s,l-1}$ других или той же компетенции.

Процесс получения нового уровня компетенции будем называть курсом обучения.

Для построения траектории обучения специалистов необходимо найти множество логических связей, определяющих взаимосвязи между курсами обучения. С этой целью предлагаются предварительно построить модель, которая включала бы не только компетенции, но и курсы обучения, что удобно осуществить с использованием гиперграфов.

Осуществим преобразование описанного выше графа связей между уровнями компетенций в гиперграф [12].

$$G = (K, U) - \quad (1)$$

вершинами которого являются уровни компетенций K , а гипердугами – курсы обучения U . При этом каждая гипердуга $u_s \in U$, такая что

$$u_s = \frac{k_{s,1}, \dots, k_{s,l-1}}{k_{s,l}}, \quad (2)$$

в которой $k_{s,1}, \dots, k_{s,l-1}$ – совход дуги, а $k_{s,l}$ – совыход, соответствует курсу обучения, позволяющему получить новый уровень $k_{s,l}$ компетенции на базе владения обучающимся уровнями $k_{s,1}, \dots, k_{s,l-1}$ других или той же компетенции. Для упрощения описания модели обычные дуги будем включать во множество гипердуг, считая, что совход и совыход содержат по одной вершине.

Гиперграф (1) взаимосвязей уровней компетенций и курсов обучения, соответствующий графу взаимосвязей между уровнями компетенций на рис. 1, представлен на рис. 2.

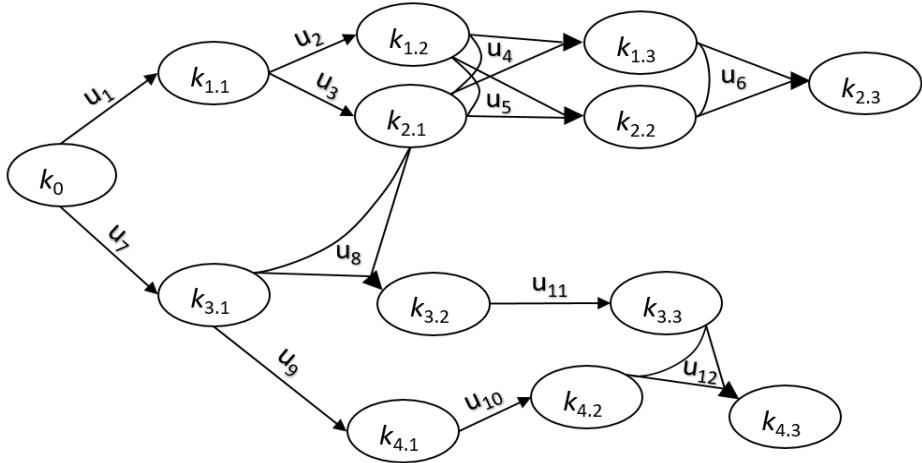


Рис. 2. Пример гиперграфа взаимосвязей компетенций и курсов обучения
Fig. 2. An example of a hypergraph of the interrelationships of competencies and training courses

Определение состава курсов обучения специалистов

Для определения состава курсов обучения специалистов необходимо найти логические связи между курсами. Это можно достичь построением на основе гиперграфа (1) его рёберного ориентированного графа:

$$H = (U, F),$$

вершинами являются гипердуги графа G вида (2), а F – отражает причинно-следственные связи между ними: дуга $f_{st} \in F$ с началом в u_s и концом в u_t в графе H означает, что совыход дуги u_s содержится в совыходе дуги u_t .

Указанный граф для гиперграфа, представленного на рис. 2, приведён на рис. 3.

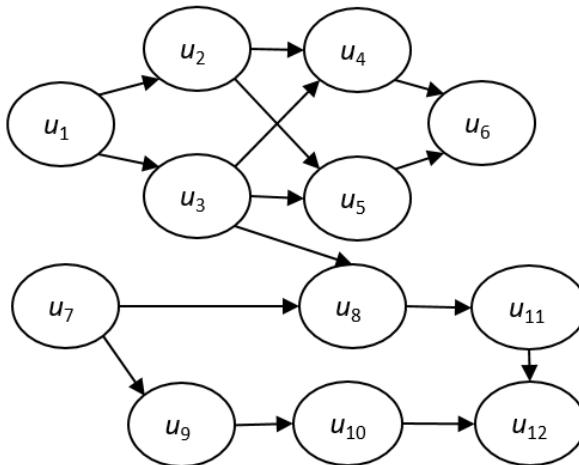


Рис. 3. Пример графа логических связей между курсами обучения
Fig. 3. An example of a graph of logical connections between courses of study

Как правило, одновременно осуществляется обучение сразу всей группы специалистов в одной образовательной организации. Освоение курсов этими специалистами может осуществляться как последовательно, так и параллельно с сохранением требованием к последовательности приобретения необходимых уровней компетенций. Поэтому полученный граф логических связей между курсами обучения может быть использован для формирования траектории обучения всей группы специалистов.

Выбор образовательной организации

При выборе образовательной организации следует учесть следующие обстоятельства:

- некоторые образовательные организации могут не обеспечивать обучение по определённым курсам обучения;
- существуют ограничения по количеству одновременно обучающихся на курсах.

Учёт первого обстоятельства позволяет выбрать те организации, которые потенциально могут осуществить групповое обучение специалистов, т.е. обеспечивают прохождение всех необходимых курсов.

Вследствие второго ограничения образовательным организациям может потребоваться различное время для группового обучения специалистов. Это вызвано тем, что в силу ресурсных ограничений образовательные организации могут не иметь возможность одновременного прохождения какого-либо курса требуемым количеством специалистов из состава группы и, следовательно, данный курс будет проходить неоднократно в рамках обучения всей группы. Данное обстоятельство приводит, как правило, к увеличению общего времени обучения.

Оценка времени может быть найдена на основе методов теории расписаний [13].

Численный пример

Первым шагом в создании описательной модели выбора курсов является определение имеющихся и требуемых компетенций для каждого специалиста группы. Для большей содержательности численного примера будем считать различными их начальные и требуемые компетенции.

Пусть специалистам группы требуется получить первые две компетенции из указанных выше четырёх. Для исключения громоздкости будем считать, что группа включает двух кандидатов, имеющих, соответственно, следующие начальные и требуемые уровни компетенций:

$$k_{1.1}, k_{2.2}, k_{3.3} \text{ и } k_{1.3}, k_{3.2}.$$

Есть необходимость подготовить их, чтобы после прохождения подготовки приобрести компетенции, соответственно:

$$k_{1.3}, k_{2.3} \text{ и } k_{1.2}, k_{2.3}.$$

Необходимость повышения компетенции до определенных уровней показана на рис. 4.

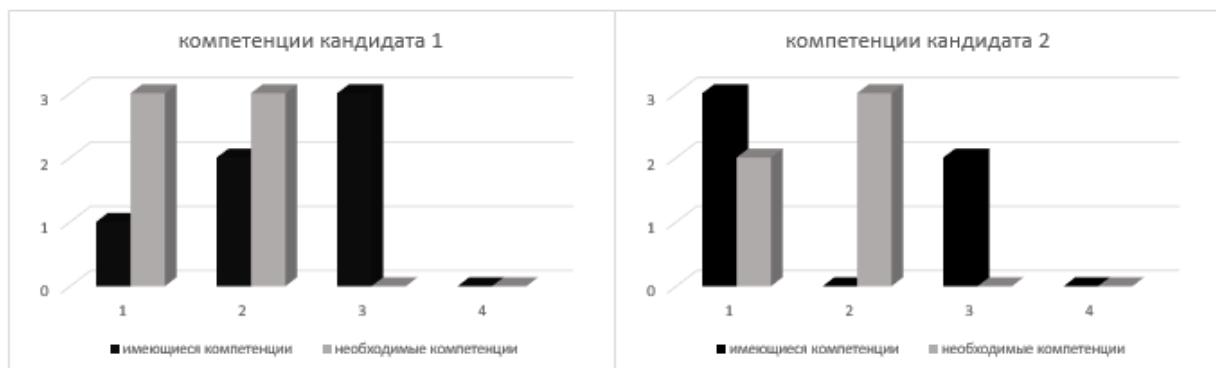


Рис. 4. Описание имеющихся и необходимых компетенций кандидатов
Fig. 4. Description of the available and necessary competencies of candidates

Следовательно, данным кандидатам необходимо повысить уровни своих компетенций, соответственно, до

$$k_{1.2}, k_{1.3}, k_{2.3} \text{ и } k_{2.1}, k_{2.2}, k_{2.3}.$$

Анализ логических связей между компетенциями и курсами подготовки, вариант которых представлен на рис. 5, позволяет определить конкретные курсы подготовки.

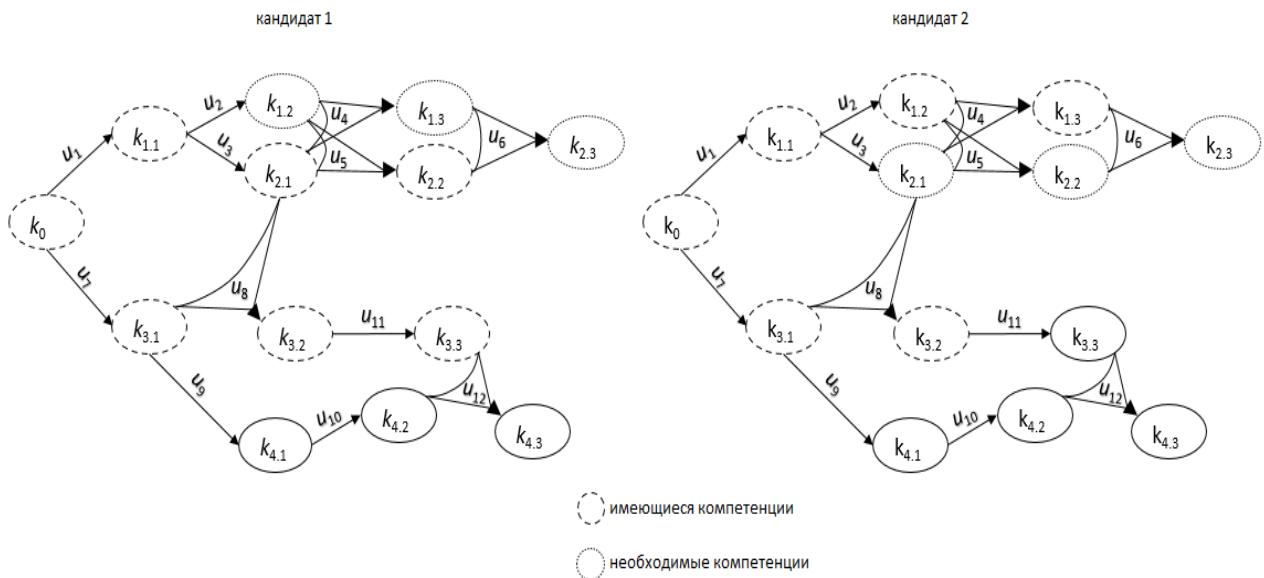


Рис. 5. Логические связи между уровнями имеющимися и необходимыми компетенциями кандидатов и курсами подготовки

Fig. 5. Logical connections between the levels of available and necessary competencies of candidates and training courses

Очевидно, что в данном примере специалистам необходимо пройти, соответственно, курсы:

$$u_2, u_4, u_6 \text{ и } u_3, u_5, u_6.$$

После этого осуществляется анализ и оценка имеющихся ресурсов организации. Ограниченност ресурсов выражается в определенном количестве обучающихся при одновременном обучении группы специалистов. Предположим, что существуют организации, которые имеют определенные курсы подготовки и ограниченность ресурсов, представленные на рис. 6 (ограничение на количество одновременно обучающихся по курсу указано в правой части соответствующей вершины графа).

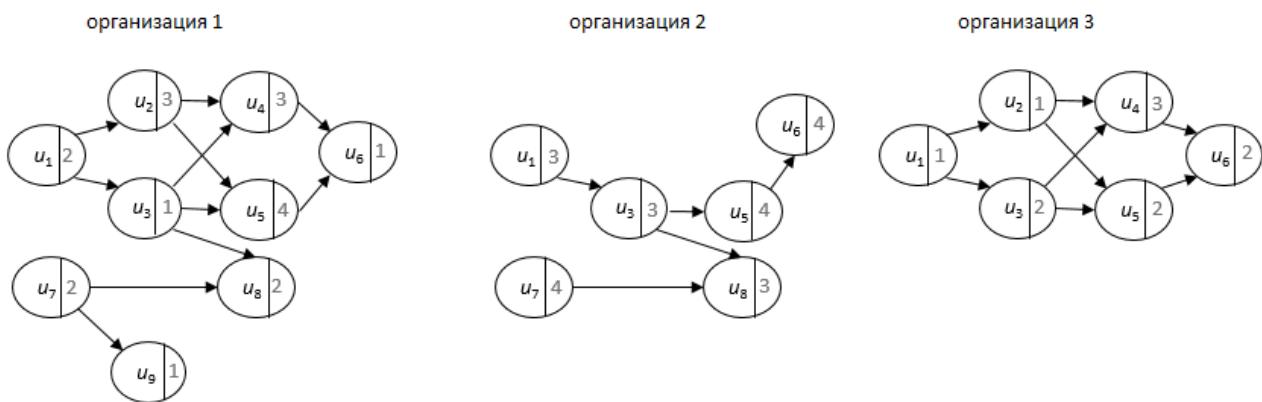


Рис. 6. Состав и логические связи между курсами подготовки в организациях

Fig. 6. The composition and logical connections between training courses in organizations

Очевидно, что в рассматриваемом примере подходят организации 1 и 3 для обоих кандидатов. Организация 2 подходит только кандидату 2, что не является необходимым решением поставленной задачи.

В рамках численного примера время обучения по каждому курсу примем одинаковым и равным T . Расписание составляется известными методами [13], представлено на рис. 7.

		организация 1			организация 3		
		u_3	u_5	u_6	u_3	u_5	u_6
кандидат 2	кандидат 1	u_2	u_4	u_6	u_2	u_4	u_6
		T	$2T$	$3T$	$4T$	T	$2T$

Рис. 7. Расписание курсов обучения кандидатов
Fig. 7. Schedule of candidates' training courses

Очевидно, что обучение в организации 1 дольше, чем в организации 3. Такое различие вызвано тем, что в организации 1 имеется ограничение на количество одновременно обучающихся на курсе u_6 , что не позволило обучать одновременно обоих кандидатов.

В результате получаем, что рассматриваемым кандидатам целесообразно обучаться в организации 3, так как она позволит им получить необходимые компетенции за минимальное время из всех возможных вариантов.

Заключение

Результаты численных экспериментов продемонстрировали хорошую сходимость предложенного метода. В будущем этот подход можно применять для улучшения процессов подготовки и переподготовки специалистов к действиям в различных вновь возникающих обстоятельствах. Также он может быть полезен для формирования индивидуальных наборов компетенций или внедрения многоуровневых программ обучения, а также учитываться в планах образовательных организаций, участвующих в подготовке описанных выше групп специалистов.

Список источников:

1. Моделирование коллективных действий сотрудников органов внутренних дел / В.В. Меньших, А.Ф. Самороковский и др. – Воронеж: Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2017. – 236 с.
2. Menshikh V.V., Sereda E.N. Optimization of Training Modules Choice During Multipurpose Training of Specialists // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2018. – Vol. 11, No. 1. – pp. 27-34.
3. Ямалов И.У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. – М.: Лабораторий Базовых Знаний, 2007. – 288 с.
4. Меньших В.В., Середа Е.Н Концептуальная модель и технология обучения коллективным действиям по принятию решений при возникновении чрезвычайных обстоятельств // Труды Академии управления МВД России. – 2016. – № 2(38). – С. 51-56.
5. Зимняя И.А. Ключевые компетенции - новая парадигма результата современного образования // Эйдос. – 2006. – № 5.
6. Johnson R. The Role of Continuous Professional Development in Enhancing Specialist Competence // Journal of Education and Training. – 2020. – Vol. 25(1), pp. 50-65.
7. Меньших В.В., Самороковский А.Ф., Середа Е.Н. Модель формирования групп для ролевого обучения принятию управленческих решений // Вестник Воронежского института МВД России. – 2015. – № 2. – С. 107-114.

References:

1. Menshikh VV, Samorokovsky AF, et al. Modeling Collective Actions of Employees of Internal Affairs Bodies. Voronezh: The Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation; 2017.
2. Menshikh V.V., Sereda E.N. Optimization of Training Modules Choice During Multi-purpose Training of Specialists. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2018;11(1):27-34.
3. Yamalov I.U. Modelling of Management Processes and Decision Making in the Conditions of Emergency Situations. Moscow: BINOMIAL. Laboratory of knowledge; 2007.
4. Menshikh V.V., Sereda E.N. A Conceptual Model and Methods of Coaching Personnel in Taking Quick Collective Decisions as Emergencies Break out. Proceedings of Management Academy of the Ministry of the Interior of Russia. 2016;2(38):51-56.
5. Zimnyaya I.A. Key Competencies is the Result of a New Paradigm of Modern Education. Eidos. 2006;5.
6. Johnson R. The Role of Continuous Professional Development in Enhancing Specialist Competence. Journal of Education and Training. 2020;25(1):50-65.
7. Menshikh V.V., Samorokovsky A.F., Sereda E.N. The Model of Group Formation for Role Training to Make Managerial Decisions. The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2015;2:107-114.

8. Меньших В.В., Середа Е.Н Математическая модель оптимизации траектории обучения сотрудников органов внутренних дел действиям при чрезвычайных обстоятельствах // Вестник Воронежского института МВД России. – 2015. – № 3. – С. 36-44.
9. Menshikh V., Sereda E., Kopylov A. Selection of learning path of specialist team for actions in emergency situations // Proceedings – 2021 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE. – Lipetsk, 2021. – P. 160-164.
10. Меньших В.В., Лихобабина А.В. Моделирование процессов оптимизации выбора программ подготовки и переподготовки специалистов с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – № 1(23). – С. 42-48.
11. Lihobabina A., Menshikh V. Model and Numerical Method of Optimization of Selection of Training Programs for Specialists // IEEE Proceedings of 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2023. – P. 447-450.
12. Овчинников В.А. Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем. – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2014. – 424 с.
13. Оптимизация временных характеристик информационных систем: монография / В.В. Меньших, Е. Ю. Никулина. – Воронеж: Воронежский ин-т МВД России, 2011. – 127 с.
8. Menshikh V.V., Sereda E.N. Mathematical Model of Optimization of Learning Path in Training of Staff of Law-Enforcement Bodies for Actions in Cases of Emergency. The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2015;3:36-44.
9. Menshikh V., Sereda E., Kopylov A. Selection of Learning Path of Specialist Team for Actions in Emergency Situations. In: Proceedings – 2021 of the 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2021; Lipetsk. p. 160-164.
10. Menshikh V.V., Likhobabina A.V. Simulating Optimization Processes for the Selection of Training and Retraining Programs for Specialists Using a Genetic Algorithm. Automation and Modelling in Design and Management. 2024;1(23):42-48.
11. Lihobabina A., Menshikh V. Model and Numerical Method of Optimization of Selection of Training Programs for Specialists. In: IEEE Proceedings of the 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA); Lipetsk: Lipetsk State Technical University: 2023. p. 447-450.
12. Ovchinnikov V.A. Graphs in Problems of Analysis and Synthesis of Complex System Structures. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2014.
13. Menshikh V.V., Nikulina E.Yu. Optimization of Temporal Characteristics of Information Systems. Voronezh: The Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation; 2011.

Информация об авторах:

Меньших Валерий Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России, заслуженный деятель науки Российской Федерации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, академик РАЕН, <http://orcid.org/0000-0001-9235-4997>

Подольских Анна Викторовна

адъюнкт Воронежского института МВД России, <http://orcid.org/0009-0003-0223-867X>

Information about the authors:

Menshikh Valery Vladimirovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mathematics and Systems Modelling of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Honoured Scientist of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, <http://orcid.org/0000-0001-9235-4997>

Podolskikh Anna Viktorovna

Adjunct of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, <http://orcid.org/0009-0003-0223-867X>

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 21.11.2024; одобрена после рецензирования 28.01.2025; принята к публикации 17.02.2025.

The article was submitted 21.11.2024; approved after reviewing 28.01.2025; accepted for publication 17.02.2025.

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

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

**Электротехнические
комплексы и системы**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.3.088.2

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-52-58

**АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ
СИНХРОСИГНАЛА В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

Кирилл Александрович Батенков¹, Олег Николаевич Катков²,

Андрей Владимирович Козленко³

¹ Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия

² Академия ФСО России, г. Орел, Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

¹ pustur@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

² katkov_orel@list.ru

³ tichars@yandex.ru

Аннотация. Целью исследования является обобщение подходов к анализу погрешности фазовых флуктуаций синхросигнала в системах передачи информации. Задачей является уточнение методического аппарата расчета погрешности времени и частоты. Методы исследования: сравнительный анализ в сочетании с анализом отечественных стандартов и зарубежных рекомендаций, касающихся измерению неточности синхросигнала вследствие воздействия помех и шумов в цифровых каналах связи. Представлены основные расчетные соотношения для показателей неточности сигналов эталонных генераторов. На примерах показан порядок их расчета и анализа, а также порядок определения соответствия нормам. Представлены параметры погрешности частоты: девиация Аллана, модифицированная девиация Аллана, девиация времени, среднеквадратическое значение погрешности интервала времени, максимальная погрешность интервала времени, а также параметр погрешности частоты: относительное отклонение частоты за время более 7 суток синхросигналов на выходах первичных эталонных генераторов. Выводы: оценка соответствия нормам стабильности частоты синхросигнала осуществляется для четырех типов смещения частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты: режим свободных колебаний, минимальная полоса статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств.

Ключевые слова: синхросигнал, цифровая система передачи, погрешность времени, погрешность частоты

Для цитирования: Батенков К.А., Катков О.Н., Козленко А.В. Анализ погрешности времени и частоты синхросигнала в цифровых системах передачи // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 52-58. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-52-58.

Original article

Open Access Article

**ANALYSIS OF TIME AND FREQUENCY ERROR OF SYNCHRONIZATION SIGNALS
IN DIGITAL TRANSMISSION SYSTEMS**

Kirill A. Batenkov¹, Oleg N. Katkov², Andrey V. Kozlenko³

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

² Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Orel, Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹ pustur@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

² katkov_orel@list.ru

³ tichars@yandex.ru

Abstract. The aim of this study is to generalize approaches to analyzing the error of phase fluctuations of the synchronization signal in information transmission systems. The objective is to refine the methodological framework for calculating time and frequency error. The research methods include comparative analysis combined with an analysis of domestic standards and international recommendations related to measuring synchronization signal inaccuracy due to the influence of interference and noise in digital communication channels. The work presents the main calculation relationships for the inaccuracy indicators of reference generator signals. Examples illustrate the procedure for their calculation and analysis, as well as the process for determining compliance with standards. The presented parameters of frequency error include Allan deviation, modified Allan deviation, time deviation, root mean square (RMS) of time interval error, maximum time interval error, and the frequency error parameter: relative frequency deviation over a period longer than 7 days for synchronization signals at the outputs of primary reference generators. Findings state that the assessment of compliance with frequency stability standards of the synchronization signal is performed for four types of frequency offset of the input reference signal from the nominal frequency: free-running mode, minimum static tracking range, dynamic tracking range, and capture range of the slave devices.

Keywords: synchronization signal, digital transmission system, time error, frequency error

For citation: Batenkov K.A., Katkov O.N., Kozlenko A.V. Analysis of Time and Frequency Error of Synchronization Signals in Digital Transmission Systems. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 52-58. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-52-58.

Введение

Поскольку непрерывное значение функции погрешности времени $x(t)$ практически неизмеримо, то рассматривают последовательность эквидистантных отсчетов:

$$x_i = x[t_0 + (i - 1)\tau_0], i = 1, 2, \dots, N,$$

где t_0 – момент начала измерений, τ_0 – временной интервал между соседними отсчетами (дискретизации).

Так как производной в непрерывном времени соответствует оператор разности в дискретном [1], то отсчеты относительного отклонения частоты:

$$y_i = \frac{|x_{i+1} - x_i|}{\tau_0}, i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Соответственно период измерений τ содержит целое число n отсчетов, т.е. $\tau = n\tau_0$. Тогда погрешность частоты:

$$y_m = \max_i y_i, i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Характеристики фазовой автоматической подстройкой частоты

Предельные значения частоты для систем с фазовой автоматической подстройкой частоты описываются четырьмя основными характеристиками: полоса статического слежения, полоса динамического слежения, полоса синхронизации, полоса захвата [1].

Взаимосвязь отсчетов функции времени T_i , полной (обобщенной) мгновенной фазы Φ_i , времени эталонного генератора $T_{r,i}$ и погрешности времени x_i имеют вид:

$$T_i = \frac{\Phi_i}{2\pi\nu_0}.$$

$$x_i = T_i - T_{r,i}.$$

Полоса статического слежения (hold-in range) – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство продолжает оставаться в режиме синхронизации при медленном изменении частоты во всем диапазоне частот. Таким образом в полосе статического слежения устройство способно отслеживать медленные (квазистационарные) вариации частоты синхросигнала.

Полоса динамического слежения (pull-out range) – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство продолжает оставаться в режиме синхронизации, а за пределами которой нет, независимо от скорости изменения частоты. Таким образом в полосе динамического слежения устройство способно отслеживать быстрые скачки частоты синхросигнала.

Полоса синхронизации (lock-in range) – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство быстро переходит на новую частоту синхронизации.

Полоса захвата (pull-in range) – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство переходит в режим синхронизации независимо от скорости захвата входного сигнала.

Характеристики погрешности частоты

Все четыре вышеприведенные характеристики описываются на основе параметра погрешности частоты y_m , т.е. в относительных единицах, не смотря на то, что определения даны в абсолютных.

Девиация Аллана d_A (*Allan deviation*) рассчитывается на основе пары отчетов частоты или тройки отсчетов времени [2]:

$$d_A = \sqrt{\frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2}, n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor.$$

Слабая различительная способность дисперсии Аллана относительно белого шума и фазового фликкер-шума привела к использованию модифицированной девиации Аллана $d_{A'}$ (*modified Allan deviation*) [1]. Модифицированная дисперсия отличается от основной дополнительным усреднением по n соседним измерениям [2]:

$$d_{A'} = \sqrt{\frac{1}{2n^4\tau_0^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor.$$

Девиация Аллана и модифицированная девиация Аллана безразмерны, поскольку являются показателями стабильности относительной частоты [1]. Для непосредственной оценки стабильности времени введена девиация времени d_t (*TDEV – time deviation*), связанная с модифицированной девиацией Аллана:

$$d_t = \frac{n\tau_0}{\sqrt{3}} d_{A'} = \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor.$$

Среднеквадратическое значение погрешности интервала времени (root mean square time interval error):

$$d_r = \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{j=1}^{N-n} (x_{i+n} - x_i)^2}, n = 1, 2, \dots, N-1.$$

Максимальная погрешность интервала времени (*MTIE – maximum time interval error*) – максимальный размах изменения задержки сигнала синхронизации по отношению к эталонному за интервал наблюдения $\tau = n\tau_0$ для всех подобных интервалов в течение периода измерения $T = (N-1)\tau_0$ (рис. 1):

$$m_x = \max_{1 \leq k \leq N-n} \left(\max_{k \leq i \leq k+n} x_i - \min_{k \leq i \leq k+n} x_i \right), n = 1, 2, \dots, N-1.$$

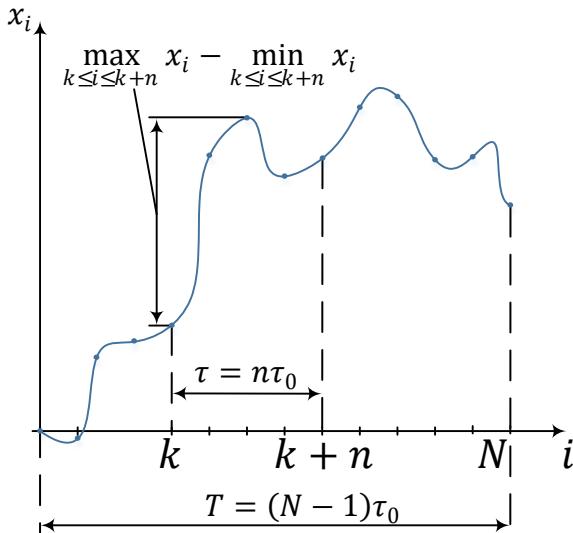


Рис. 1. Пример графика отсчетов погрешности времени
Fig. 1. Example of time error graphs

Поскольку флюктуации фазы произвольны, например, могут соответствовать модели гауссового распределения, то значения отсчетов погрешности времени x_i способны принимать значения, стремящиеся к бесконечности, пусть и маловероятные [1]. Таким образом, измеренные значения максимальной погрешности интервала времени m_x зависят не только от интервала наблюдения $\tau = n\tau_0$, но и от периода измерения $T = (N - 1)\tau_0$, хотя и в меньшей степени. Кроме того, одно измерение максимальной погрешности интервала времени m_x по единственной реализации случайного процесса отсчетов погрешности времени x_i на данном периоде измерения T констатирует лишь конкретный результат эксперимента, что не позволяет его использовать для строгой оценки качества синхросигнала.

Оценка максимальной погрешности интервала времени и соответствующий уровень статистической достоверности рассчитывается на основе данных, полученных на различных интервалах измерения. Так, обозначив за X_i , $i = 1, 2, \dots, M$ набор независимых измеренных величин максимальной погрешности интервала времени при заданном интервале наблюдения τ для M периодов измерения длительностью T каждый. Упорядочив по возрастанию значения максимальной погрешности интервала времени $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_M$ и обозначив x_β квантиль порядка β случайной величины X , рассчитывается как вероятность того, что x_β попадает в интервал между отсчетами X_i и X_j :

$$P(X_i \leq x_\beta \leq X_j) = \sum_{k=i}^{j-1} C_M^k \beta^k (1 - \beta)^{M-k}, i < j, i, j = 1, 2, \dots, M.$$

где $P(A)$ — вероятность события A ; $C_M^k = \frac{M!}{k!(M-k)!}$ — биноминальный коэффициент.

Погрешность времени

Основным параметром, подлежащим эксплуатационному контролю при техническом обслуживании первичных эталонных генераторов PRC и требующим специального метрологического обеспечения, является погрешность частоты (относительное отклонение частоты за время более 7 суток) синхросигналов на выходах первичных эталонных генераторов [3].

В режиме свободных колебаний погрешность частоты выходного синхросигнала различных видов генераторов не должна превышать значений, приведенных в табл. 1, в течение заданного периода измерений [4 – 8].

Нормы погрешности частоты синхросигнала
Standards for clock signal frequency error

Таблица 1

Table 1

Уровень иерархии	Вид генератора	Максимальная погрешность частоты	Период измерений
Первичный эталонный генератор PRC	Стандартный	10^{-11}	7 сут.
	Улучшенный	10^{-12}	7 сут.
Вторичный задающий генератор	Тип I	—	—
	Тип II	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1 год
	Тип III	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1 год
	Тип IV	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1 год
	Тип V	—	—
	Тип VI	—	—
Генератор сетевого элемента	Вариант 1	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1 мес., 1 год
	Вариант 2	$2 \cdot 10^{-5}$	1 мес., 1 год

Минимальные полосы статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств должны соответствовать табл. 2, независимо от смещения частоты внутреннего генератора [6, 7, 9].

Минимальные полосы статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств

Таблица 2

Table 2

Minimum static tracking, dynamic tracking and slave acquisition bandwidths

Уровень иерархии	Тип генератора	Полоса захвата	Полоса статического слежения	Полоса динамического слежения
Вторичный задающий генератор	Тип I	10^{-8}	—	—
	Тип II	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	—
	Тип III	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	—
	Тип IV	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	—
	Тип V	—	—	—
	Тип VI	—	—	—
Генератор сетевого элемента	Вариант 1	$4,6 \cdot 10^{-6}$	—	$4,6 \cdot 10^{-6}$
	Вариант 2	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	—

Анализ погрешности времени

Пример 1. Измеренные на частоте дискретизации 10 МГц значения фазы гармонического синхросигнала с частотой 2,048 МГц следующие: 1,286796423; 2,573595597; 3,860397647; 5,147192479; 0,150805658; 1,437593734; 2,724389916; 4,011189339; 5,297987002; 0,301594302.

Определить соответствие характеристик синхросигнала параметрам погрешности частоты генераторов.

Дано: $f_d = 10$ МГц, $v_0 = 2,048$ МГц, $\Phi'_1 = 1,286796423$; $\Phi'_2 = 2,573595597$; $\Phi'_3 = 3,860397647$; $\Phi'_4 = 5,147192479$; $\Phi'_5 = 0,150805658$; $\Phi'_6 = 1,437593734$; $\Phi'_7 = 2,724389916$; $\Phi'_8 = 4,011189339$; $\Phi'_9 = 5,297987002$; $\Phi'_{10} = 0,301594302$.

Найти: y_m .

Измеренные значения фазы находятся в диапазоне от 0 до 2π , т.е. $\Phi'_i \in [0; 2\pi]$, $i = 1, 2, \dots, 10$. Поэтому для нахождения реального времени тактового генератора необходимо их привести к возрастающему виду:

$$\Phi_1 = \Phi'_1, \Phi_i = \begin{cases} \Phi'_i + 2\pi \left\lfloor \frac{\Phi'_{i-1}}{2\pi} \right\rfloor, & \Phi'_i \leq \Phi'_{i+1}, \\ \Phi'_i + 2\pi \left\lfloor \frac{\Phi'_{i-1}}{2\pi} \right\rfloor, & \Phi'_i > \Phi'_{i+1}, \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, 10.$$

Рассчитанные значения полной фазы приведены в табл. 3. Отсчеты функции времени (см. табл. 3):

$$T_i = \frac{\Phi_i}{2\pi\nu_0}; T_1 = \frac{1,286796423}{2\pi \cdot 2,048} = 0,1000000056 \text{ (мкс)}.$$

Отсчеты функции времени эталонного генератора (см. табл. 3):

$$T_{r,i} = \frac{i}{f_d}; T_{r,1} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ (мкс)}.$$

Отсчеты погрешности времени (см. табл. 3):

$$x_i = T_i - T_{r,i}; x_1 = 0,1000000056 - 0,1 = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ (мкс)}.$$

Отсчеты относительного отклонения частоты (см. табл. 3):

$$y_i = \frac{|x_{i+1} - x_i|}{\tau_0} = f_d |x_{i+1} - x_i|; y_1 = 10 \cdot |2,3 \cdot 10^{-7} - 5,6 \cdot 10^{-9}| = 2,2 \cdot 10^{-6}.$$

Тогда погрешность частоты (см. табл. 3):

$$y_m = \max_i y_i = 6,4 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, погрешность частоты синхросигнала соответствует только нормам для генератора сетевого элемента (вариант 2) (табл. 1), а также для его полос захвата и статического слежения (табл. 2).

Параметры синхросигнала
Clock parameters

Таблица 3

Table 3

<i>i</i>	Φ'_i	Φ_i	$T_i, \text{мкс}$	$T_{r,i}, \text{мкс}$	$x_i, \text{пс}$	$y_i \cdot 10^{-6}$
1	1,286796423	1,286796423	0,1000000056	0,1	0,0056	2,2
2	2,573595597	2,573595597	0,200000225	0,2	0,23	4,4
3	3,860397647	3,860397647	0,3000006679	0,3	0,67	1,2
4	5,147192479	5,147192479	0,4000005498	0,4	0,55	1,7
5	0,150805658	0,150805658	0,5000007158	0,5	0,72	6,4
6	1,437593734	1,437593734	0,6000000727	0,6	0,073	0,13
7	2,724389916	2,724389916	0,7000000596	0,7	0,06	2,4
8	4,011189339	4,011189339	0,8000002983	0,8	0,3	1
9	5,297987002	5,297987002	0,9000004003	0,9	0,4	2,9
10	0,301594302	0,301594302	1,0000001094	1	0,11	—
y_m					$6,4 \cdot 10^{-6}$	

Заключение

В работе обобщены основополагающие особенности оценки соответствия нормам стабильности частоты синхросигнала осуществляется для четырех типов смещения частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты: режим свободных колебаний, минимальная полоса статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств.

Список источников:

References:

- Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи / Пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, С.Я. Несвitsкой, Н.Р. Тришки; Под ред. А.В. Рыжкова. – М.: Мир, 2003. – 417 с.
- Rec. G.810. Definitions and terminology for synchronization networks. – 1996-08. – Geneva: ITU-T, 1996. – 27 p.
- Breni S. Synchronization of Digital Telecommunications Networks. Biryukov NL, Nesvitskaya SYa, Triska NR, translators; Ryzhkov AV, editor. Moscow: Mir; 2003.
- Rec. G.810. Definitions and Terminology for Synchronization Networks. 1996-08. Geneva: ITU-T; 1996.

3. Инструкция по метрологическому обеспечению первичных эталонных генераторов (ПЭГ) системы сетевой тактовой синхронизации (ТСС): Утв. Минсвязи России 26.10.99. – Москва: МК-Полиграф, 2000. – 56 с.
4. Rec. G.811. Timing characteristics of primary reference clocks. – 1997-09. – Geneva: ITU-T, 1997. – 11 p.
5. Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ надежности телекоммуникационных сетей, поддерживающих механизмы защитного переключения и восстановления для одного основного маршрута // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 65. – С. 58–68.
6. Rec. G.813. Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC). – 2003-03. – Geneva: ITU-T, 2003. – 36 p.
7. Rec. G.812. Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks. – 2004-06. – Geneva: ITU-T, 2004. – 46 p.
8. Rec. G.811.1. Timing characteristics of enhanced primary reference clocks. – 2017-08. – Geneva: ITU-T, 2017. – 14 p.
9. Батенков К.А. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 6(115). – С. 53-63.
3. Instructions for Metrological Support of Primary Reference Clocks (PRC) of the Network Clock Synchronization System (NCSS). Moscow: MK-Poligraf, 2000.
4. Rec. G.811. Timing Characteristics of Primary Reference Clocks. 1997-09. Geneva: ITU-T; 1997.
5. Batenkov K.A., Fokin A.B. Reliability Analysis of Telecommunication Networks Supporting Protective Switching and Recovery Mechanisms for One Main Route. Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. 2023;65:58-68.
6. Rec. G.813. Timing Characteristics of SDH Equipment Slave Clocks (SEC). – 2003-03. Geneva: ITU-T; 2003.
7. Rec. G.812. Timing Requirements of Slave Clocks Suitable for Use As Node Clocks in Synchronization Networks. 2004-06. Geneva: ITU-T; 2004.
8. Rec. G.811.1. Timing Characteristics of Enhanced Primary Reference Clocks. 2017-08. Geneva: ITU-T; 2017.
9. Batenkov K.A. Analysis of the Probability of Connectivity of a Telecommunications Network Based on the Reduction of Several Non-Connectivity Events to a Union of Independent Events. Information and Control Systems. 2021;6(115):53-63.

Информация об авторах:

Батенков Кирилл Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор Московского технического университета связи и информатики, Scopus-Author ID 35777325300, Author-ID-РИНЦ 7727-1166, <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

Катков Олег Николаевич

кандидат технических наук, доцент, сотрудник Академии ФСО России, Author-ID-РИНЦ 8389-7290

Козленко Андрей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, доцент РТУ МИ-РЭА

Information about the authors:

Batenkov Kirill Alexandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow Technical University of Communications and Informatics, Scopus-Author ID: 35777325300, Author-ID-RSCI: 7727-1166, <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

Katkov Oleg Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Employee of Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Author-ID-RSCI: 8389-7290

Kozlenko Andrey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of MIREA – Russian Technological 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 21.09.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 06.02.2025.

The article was submitted 21.09.2024; approved after reviewing 16.12.2024; accepted for publication 06.02.2025.

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 629.423:621.3.027

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-59-64

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Николай Александрович Лукашов^{1✉}, Виталий Сергеевич Суслов²,

Артём Михайлович Масонов³, Олег Сергеевич Маганков⁴

¹ Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

² ООО «АИР», Брянская обл. г. Жуковка, Россия

³ ОАО «РЖД», г. Москва, Россия

⁴ ОП ООО «ТМХ Инжиниринг» в г. Брянск, Россия

¹ Lukashov32@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-6733-2039>

² v.suslov99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ artemmasonov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ o.magankov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. На грузовых локомотивах асинхронный тяговый привод работает при тяжелых режимах и небольшой интенсивности охлаждения, что способствует перегреву обмоток и тепловому пробою их изоляции. Исходя из этого, необходимо более детальное изучение теплового состояния тягового асинхронного двигателя, а также способов предотвращения его перегрева, способствующего быстрому изнашиванию обмоток ротора и их изоляции. В связи с чем актуальной является задача в определении влияния формы пазов ротора, которые, в свою очередь, определяют сечения стержней обмотки, на тепловое состояние тягового асинхронного двигателя. На основе проведенного анализа исследований отечественных и зарубежных ученых были рассмотрены варианты сечений стержней обмотки ротора такие как: прямоугольные, трапециевидные, лопаточные, грушевидные и колбообразные. Для каждого сечения стержней рассчитывались показатели теплового состояния, на основании которых предложен оптимальный вариант сечения, который снижает температуру обмоток ротора при работе тягового асинхронного двигателя.

Ключевые слова: тяговый асинхронный двигатель, обмотка, ротор, стержень, теплоотдача

Для цитирования: Лукашов Н.А., Суслов В.С., Масонов А.М., Маганков О.С. Оптимизация работы асинхронного тягового привода локомотива за счет снижения температуры обмоток ротора электродвигателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 59-64. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-59-64.

Original article

Open Access Article

OPTIMIZATION OF THE ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE OF A LOCOMOTIVE BY REDUCING THE TEMPERATURE OF THE ELECTRIC MOTOR ROTOR WINDINGS

Nikolay A. Lukashov^{1✉}, Vitaly S. Suslov², Artem M. Masonov³, Oleg S. Magankov⁴

¹ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

² AIR LLC, Zhukovka, the Bryansk region, Russia

³ Open Joint Stock Company Russian Railways, Moscow, Russia

⁴ Separate Subdivision of Transmashholding Engineering LLC in Bryansk, Russia

¹ Lukashov32@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-6733-2039>

² v.suslov99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ artemmasonov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ o.magankov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract. On freight locomotives, asynchronous traction drives operate under heavy-duty conditions with limited cooling intensity, which contributes to overheating the windings and thermal breakdown of their insulation. Therefore, a more detailed study of the thermal state of the traction asynchronous motor is necessary, as well as of the methods to prevent its overheating, which leads to rapid wear of the rotor windings and their insulation. Consequently, a key task is to determine the influence of the rotor slot shape, which in turn defines the cross-sectional area of the winding bars on the thermal state of the traction asynchronous motor. Based on the research analysis of domestic and foreign scientists, various cross-sectional shapes for the rotor winding bars are considered, such as rectangular, trapezoidal, blade-shaped, pear-shaped, and bulbous ones. For each cross-section of the bars, the authors calculate thermal performance indicators, based on which they propose an optimal cross-section variant that will reduce the temperature of the rotor windings during operation of the traction asynchronous motor.

Keywords: traction asynchronous motor, winding, rotor, bar, heat transfer

For citation: Lukashov N.A., Suslov V.S., Masonov A.M., Magankov O.S. Optimization of the Asynchronous Traction Drive of a Locomotive by Reducing the Temperature of the Electric Motor Rotor Windings. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 59-64. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-59-64.

Асинхронный тяговый привод нашел широкое применение на подвижном составе отечественного и зарубежного производства. К числу достоинств тягового асинхронного привода можно отнести следующие: простота устройства, высокая надежность, жесткая естественная характеристика, уменьшение веса за счет меньшего расхода меди, снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт. Данные достоинства являются перспективными для применения электрических передач переменного тока при производстве отечественных локомотивов нового поколения, а совершенствование характеристик асинхронного тягового привода является передовой задачей для инженеров.

В нашей стране такой вид передачи установлен на маневровых четырехосных тепловозах ТЭМ21 и 2ТЭ25А, построенных Брянским машиностроительным заводом.

В грузовых локомотивах асинхронный тяговый привод работает при тяжелых режимах и небольшой интенсивности охлаждения, что способствует перегреву обмоток и тепловому пробою изоляции. В связи с чем необходимо более детальное изучение теплового состояния тягового асинхронного двигателя (ТАД), а также способов снижения быстрого изнашивания изоляции и обмоток.

Асинхронный тяговый двигатель в процессе эксплуатации имеет неустановившиеся тепловые режимы. Их инерция в большей степени превышает инерцию электромеханического состояния двигателя. Таким образом при определении изменения температур в обмотках ТАД учет тепловой энергии является условием, при котором будут получены наиболее достоверные результаты.

Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного тягового двигателя за счет вытеснения тока создает момент на валу, увеличение которого возможно за счет изменения сечения стержней, используемых в конструкции обмотки, которые определяются формой пазов ротора. Правильно подобранная форма стержня способствует более точному распределению тока по сечению проводника, что улучшает электромеханические свойства двигателя. Однако следует отметить, что различные формы сечений стержней обмотки оказывают влияние также на теплотехнические свойства двигателя [1, 2]. В связи с чем актуальной является задача в определении влияния формы сечения стержней обмотки на тепловое состояние статора и ротора тягового асинхронного двигателя.

В качестве объекта исследования был принят тяговый асинхронный электродвигатель ДТА-350Т. Данный ТАД применяется на тепловозах ТЭМ21 и 2ТЭ25А. Он предназначен для использования на колесных парах локомотива, обладает мощностью на валу 350 кВт, работает при максимальном линейном напряжении 1410 В и обеспечивает частоту тока статора до 125 Гц. Двигатель имеет шесть полюсов и в краткосрочном режиме (при трогании) может выдавать фазный ток до 470 А и вращающий момент не менее 10500 Н·м.

Для установления эффективной формы сечения стержней обмотки ротора ТАД, которые будут иметь наименьшее нагрев в процессе эксплуатации, на основе проведенного анализа отечественных и зарубежных исследований, было рассмотрено несколько вариантов сечений: прямоугольные, трапециевидные, лопаточные, грушевидные и колбообразные (рис. 1) [3, 4].

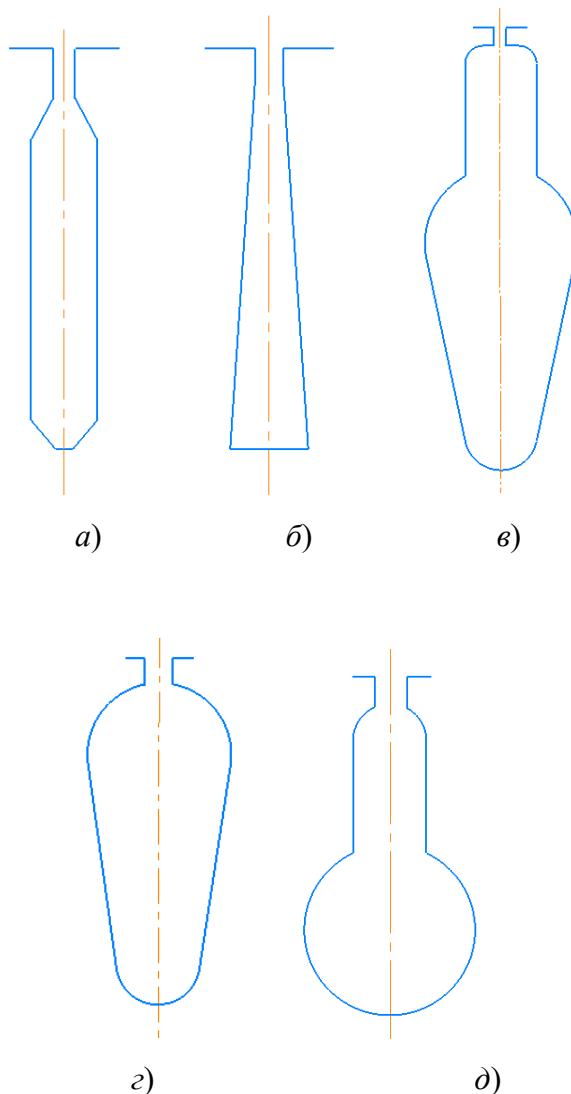


Рис. 1. Формы стержней обмотки ротора:

a – прямоугольная; б – трапециевидная; в – лопаточные; г – грушевидные; д – колбообразные

Fig. 1. Shapes of rotor winding rods:

a – rectangular; b – trapezoidal; c – blade-shaped; d – pear-shaped; d – flask-shaped

Для увеличения пусковых моментов двигателей прямоугольные пазы делают узкими и глубокими, т.к. эффект вытеснения тока в них возрастает с увеличением высоты стержня. Роторы с такими пазами называют глубокопазными.

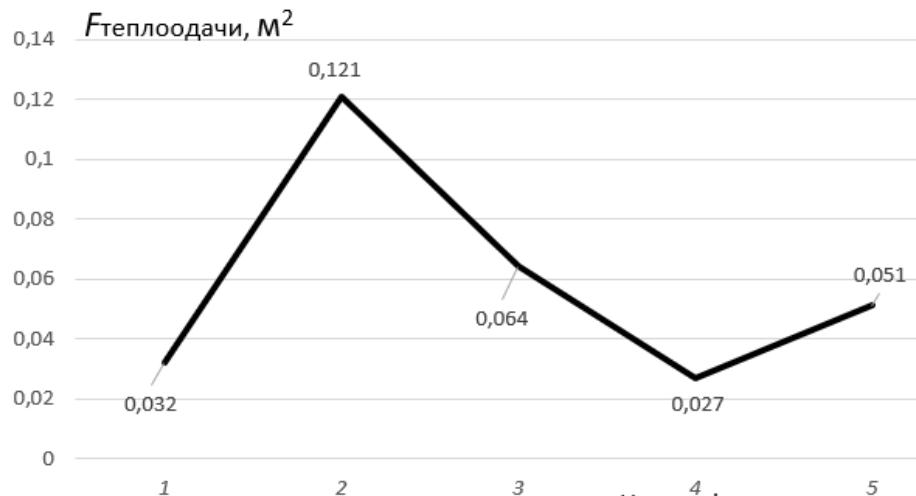
Чтобы определить в какой степени форма стержня ротора влияет на температуру обмоток было проведено исследование температурных режимов работы тягового асинхронного двигателя с помощью моделирования протекания тепловых процессов в элементах машин в промышленном программном комплексе.

При моделировании учитывалось, что поперечные сечения стержней обмотки ротора эквивалентны по значениям номинальных тяговых моментов и сопротивлений с реальными значениями сечений стержней принятого двигателя ДТА-350Т. В качестве материала стержней задавалась медь, а площади поперечных сечений каждой формы стержней ротора были идентичны между собой.

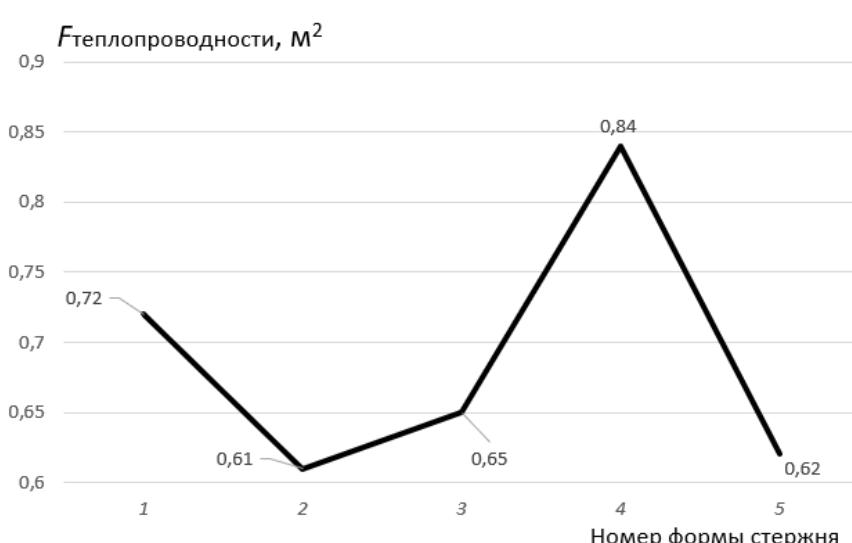
При моделировании были получены параметры теплового состояния обмоток, такие как площади F теплоотдачи и теплопроводности, а также значение теплопередачи от стержней ротора в атмосферу [5 – 7].

В ходе анализа полученных расчетных данных при моделировании установлено, что наибольшую поверхность теплоотдачи имеет стержень трапециевидной формы, которая

составляет $0,121 \text{ м}^2$, наименьшее значение этого параметра у сечения стержней обмотки грушевидной формы, которое составляет $0,026 \text{ м}^2$ (рис. 2, *a*). Также установлено, что наибольшую площадь теплопроводности к ротору имеет сечение стержня грушевидной формы, которая составляет $0,84 \text{ м}^2$ (рис. 2, *б*), трапециевидные, лопаточные и колбообразные сечения получили приблизительно одинаковые значения, которые составляют около $0,06 \text{ м}^2$.



a)



б)

Рис. 2. График значений площадей поверхности теплоотдачи (*a*) и теплопроводности к ротору (*б*) для разных форм сечений обмотки ротора:

1 – прямоугольные; 2 – трапециевидные; 3 – лопаточные; 4 – грушевидные; 5 – колбообразные

Fig. 2. Graph of heat transfer surface area values (*a*) and thermal conductivity to the rotor (*b*) for different rotor winding cross-section shapes:

1 – rectangular; 2 – trapezoidal; 3 – blade-shaped; 4 – pear-shaped; 5 – flask-shaped

В результате расчета также было получено значение теплоотдачи стержней в атмосферу q с разными сечениями (рис. 3). Установлено, что наибольшее значение этого показателя зафиксировано для трапециевидного сечения и составило около $274 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}$, а наименьшее для грушевидного – $148,6 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}$.

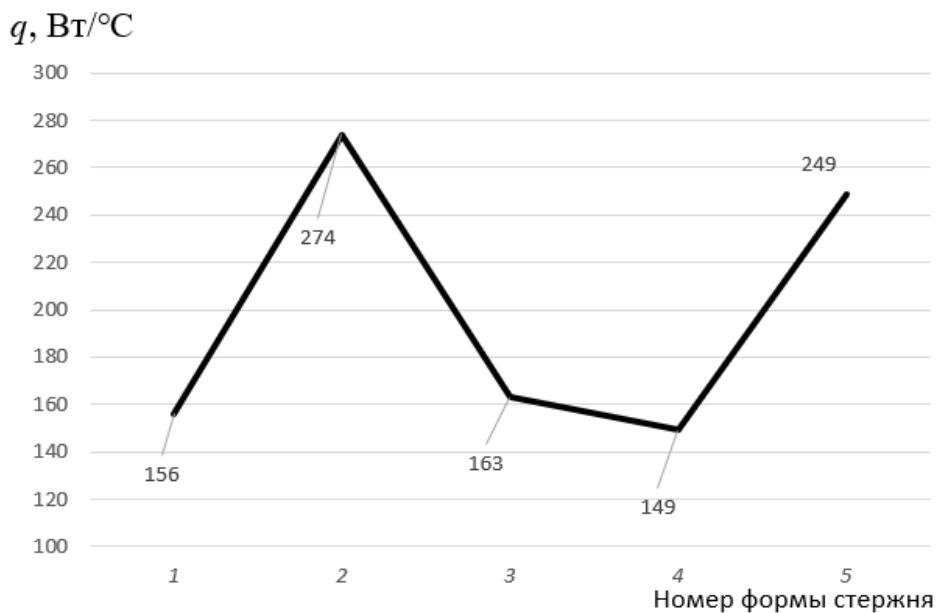


Рис. 3. График значений теплоотдачи стержней ротора в атмосферу:
 1 – прямоугольные; 2 – трапециевидные; 3 – лопаточные; 4 – грушевидные; 5 – колбообразные
Fig. 3. Graph of heat transfer values of rotor rods into the atmosphere:
 1 – rectangular; 2 – trapezoidal; 3 – blade-shaped; 4 – pear-shaped; 5 – flask-shaped

Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод что наибольшей теплоотдачей обладает трапециевидная форма сечения обмотки статора ТАД, наименьшей – грушевидная. В связи с этим рекомендуется использование трапециевидной формы для избегания перегрева обмотки и теплового пробития изоляции ТАД на локомотиве.

Список источников:

- Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2025. – 828 с.
- Проектирование электрических машин. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.
- Разработка методов выбора параметров асинхронного тягового двигателя с учетом теплового состояния обмоток: дис. кан. техн. наук: 05.14.01/ Тихонов Филип Владимирович. – М., 2008. – 136 с.
- Электрические машины. Асинхронные машины: учебное пособие для вузов / Е.И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2017. – Ч. 2. – 304 с.
- Зюзев А.М., Метельков В.П. Оценка нагрева обмотки статора асинхронного двигателя в электроприводе с периодическим характером нагружения // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – №1. – 7 с.
- Федорова К.Г. Обзор существующих тепловых моделей для частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя // Главный энергетик. – 2018. – №7.
- Расчет асинхронных двигателей: Пособие для выполнения курсовой работы / В.Н. Галушко, И.С. Евдасев и др. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 158 с.
- Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

References:

- Kopylov I.P. Design of Electrical Machines. 4th ed. Moscow: Yurait [Internet]. 2025 [cited 2025 Feb 14]. Available from: <https://urait.ru/bcode/566208>
- Design of Electrical Machines. 3rd ed. Moscow: Energia; 1970.
- Tikhonov F.V. Developing Methods for Selecting the Parameters of an Asynchronous Traction Motor Taking Into Account the Thermal State of the Winding. Candidate of Technical Sciences Thesis. Moscow; 2008.
- Zabudsky E.I. Electrical Machines. Asynchronous Machines. Part 2. Moscow: Megapolis; 2017.
- Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Evaluation of Heating of the Stator Winding of an Asynchronous Motor in an Electric Drive With a Periodic Loading Pattern. Electrotechnical Systems and Complexes.
- Fedorova K.G. Review of Existing Thermal Models for Frequency-Regulated Asynchronous Electric Motor. Chief Power Engineer. 2018;7.
- Galushko V.N., Evdasev I.S., Patskevich V.A., Drobov A.V. Calculation of Asynchronous Motors. Part 2. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2016.
- Kopylov I.P. Design of Electrical Machines. Moscow: Energy; 1980.

Информация об авторах:

Лукашов Николай Александрович

аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог»

Суслов Виталий Сергеевич

Инженер-конструктор ООО «АИР»

Масонов Артём Михайлович

Специалист Эксплуатационного вагонного депо Бирюлёво-структурное подразделение Московской дирекции инфраструктуры структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры-филиала ОАО «РЖД»
г. Москва

Маганков Олег Сергеевич

инженер-конструктор 1 категории, ОП ООО «ТМХ Инжиниринг» в г. Брянск, КБ «Локомотивы», бюро кузовов и кабин

Information about the authors:

Lukashov Nikolay Aleksandrovich

Postgraduate student at the Department of Rolling Stock of Railways

Suslov Vitaly Sergeevich

Design Engineer of AIR LLC

Masonov Artem Mikhailovich

Railcar Inspector and Repairman of JSC Russian Railways, Moscow

Magankov Oleg Sergeevich

Design Engineer of the 1st category of Separate Subdivision of Transmashholding Engineering LLC in Bryansk, Locomotives Design Bureau, Car Body and Cab Department

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 03.03.2025; одобрена после рецензирования 07.03.2025; принята к публикации 12.03.2025.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 07.03.2025; accepted for publication 12.03.2025.

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

Reviewer – Malakhnov A.A., Candidate 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. Петраченкова.

Сдано в набор 14.03.2025. Выход в свет 28.03.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 7,44.

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

