

ISSN print 2658-3488  
ISSN online 2658-6436

№3(25)  
**2024**

Научно-технический журнал

# Автоматизация и моделирование

в проектировании и управлении



# АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ



## В проектировании и управлении

Издается с 2018 года

№ 3(25) 2024

DOI:10.30987/issn.2658-3488

### ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

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

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

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

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

**Карпенко А.П.**, д-р. физ.-мат. наук, проф. (Москва)

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

**Кравец А.Г.**, д-р. техн. наук, проф. (Волгоград)

**Курейчик В.В.**, д-р. техн. наук, проф. (Таганрог)

**Макарова Е.И.**, д-р. техн. наук, доц. (Санкт-Петербург)

**Мешеряков В.Н.**, д-р. техн. наук, проф. (Липецк)

**Михальченко С.Г.**, д-р. техн. наук, доц. (Томск)

#### Редколлегия

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

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

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

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

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

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

**Петрешин Д.И.**, д-р. техн. наук, доц. (Брянск)

**Подвесовский А.Г.**, канд. техн. наук, доц. (Брянск)

**Пугачев А.А.**, д-р. техн. наук, доц. (Брянск)

**Пылькин А.Н.**, д-р. техн. наук, проф. (Рязань)

**Скрыпников А.В.**, д-р. техн. наук, проф. (Воронеж)

**Федяева Г.А.**, д-р. техн. наук, доц. (Брянск)

**Феофанов А.Н.**, д-р. техн. наук, проф. (Москва)

**Хейфец М.Л.**, д-р. техн. наук, проф. (Беларусь)

**Чепчуров М.С.**, д-р. техн. наук, проф. (Белгород)

**Шептунов С.А.**, д-р. техн. наук, проф. (Москва)

**Ярушкина Н.Г.**, д-р. техн. наук, проф. (Ульяновск)

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

Адрес редакции:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

тел.: (4832) 56-49-90

www.aimpu.ru

E-mail: aim-pu@mail.ru

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

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

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

Журнал распространяется по подписке:

индекс Э80855 по интернет-каталогу

"Пресса по подписке".

Статьи журнала находятся под лицензией CC BY 4.0 Creative Commons Attribution 4.0 License

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис CrossRef

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

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

# **AUTOMATION AND MODELING**

SCIENTIFIC TECHNICAL  
JOURNAL



## **in design and management**

Issued since 2018

№ 3(25) 2024

DOI:10.30987/issn.2658-3488

### **QUARTERLY SCIENTIFIC JOURNAL**

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

**«Bryansk State Technical University» (BSTU)**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*(St. Petersburg)*

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

**S.G. Mikhilchenko**, *D. Eng., Assoc. Prof. (Tomsk)*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Editorial board*

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

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

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

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

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

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

*Tel.: (4832) 56-49-90*

*www.aimpu.ru*

*E-mail: aim-pu@mail.ru*

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

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

The magazine is distributed by subscription:  
index 80855 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

**Малаханов А.А., Пугачев А.А., Маркова В.К.** Применение сканирующей электронной микроскопии в реверс-инжиниринге электронной компонентной базы

4

**Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Григоренко И.Н., Иващук Д.А., Нестеров В.Г., Каложная Е.В.** Автоматизация прогнозирования неисправностей медтехники

13

**Орехов Д.В.** Опыт применения системы автоматизированного проектирования специализированных гидравлических станций на промышленном предприятии

23

**Юдин Д.В., Феофанов А.Н.** Формализация припуска, удаляемого при обработке резанием, для решения задачи автоматизации разработки технологического процесса

29

### Математическое и компьютерное моделирование

**Брич И.А., Шептунов С.А.** Проблемы реализации систем полуавтоматического управления, включающих контур обратной связи по усилию

35

**Реутов А.А.** Моделирование пуска ДВС автомобиля с бесступенчатой коробкой передач

41

**Фока О.Д., Дмитроченко О.Н.** Задача оптимального стохастического управления и оценки стоимости корпоративных облигаций, зависящих от времени и случайных состояний параметров

53

**Ковалев М.В., Шкаберин В.А., Рытов М.Ю., Шпичак С.А.** Моделирование процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимом объекте критической информационной инфраструктуры

65

### Управление в организационных системах

**Шептунов С.А., Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А.** Информационные основания системы технологического обеспечения механической сборки в условиях цифровой трансформации предприятий автомобилестроительного кластера

75

### Электротехнические комплексы и системы

**Дзюин Д.В., Дмитриева В.В.** Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя

84

## CONTENTS

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

**Malakhanov A.A., Pugachev A.A., Markova V.K.** Applying Scanning Electron Microscopy in Reverse Engineering of Electronic Component Base

**Nesterova E.V., Igrunova S.V., Grigorenko I.N., Ivashchuk D.A., Nesterov V.G., Kalyuzhnaya E.V.** Automation of Medical Equipment Failure Forecasting

**Orekhov D.V.** Experience of Using the Automated Design System for Specialized Hydraulic Stations at an Industrial Enterprise

**Yudin D.V., Feofanov A.N.** Formalizing the Allowance Removed During Cutting to Solve the Problem of Automating the Technological Process Development

### Mathematical and computer modeling

**Brich I.A., Sheptunov S.A.** Problems of Implementing Semi-Automatic Control Systems Including a Force Feedback Loop

**Reutov A.A.** Simulation of Starting an Internal Combustion Engine of a Car with a Continuously Variable Transmission

**Foka O.D., Dmitrochenko O.N.** The Problem of Optimal Stochastic Control and Corporate Bond Valuation, Depending on Time and Random States of Parameters

**Kovalev M.V., Shkaberin V.A., Rytov M.Yu., Shpichak S.A.** Simulating the Process of Forecasting the Computing Power Deficit at a Significant Object of Critical Information Infrastructure

### Management in organizational systems

**Sheptunov S.A., Averchenkov A.V., Averchenkova E.E., Shabanov A.A.** Information Grounds for the Technological Support System for Mechanical Assembly in the Context of Digital Transformation of the Automotive Cluster Enterprises

### Electrotechnical complexes and systems

**Dzyuin D.V., Dmitrieva V.V.** Developing a Program for Calculating the Equivalent Circuit Parameters of a Three-Phase Asynchronous Electric Motor



## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.382.2/.3

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-4-12

### **ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ В РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ**

**Алексей Алексеевич Малаханов<sup>1</sup>, Александр Анатольевич Пугачев<sup>2</sup>,  
Валерия Константиновна Маркова<sup>3✉</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> malakhan@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

<sup>2</sup> alexander-pugachev@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

<sup>3</sup> markovaic4499@mail.ru

**Аннотация.** Показана актуальность применения сканирующей электронной микроскопии в задачах анализа и синтеза микро- и наноразмерных структур полупроводниковых приборов. Целью статьи является анализ качества структур полупроводниковых приборов в составе интегральных микросхем, восстановление последовательности технологических операций и реверс-инжиниринга. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: исследованы диэлектрические и проводящие структуры полупроводниковых приборов в составе интегральных микросхем, проанализированы результаты измерения линейных размеров элементов полупроводниковых приборов, вычислен коэффициент запыленности. Исследование проведено с помощью методов натурального эксперимента, цифровых методов обработки графической информации. В качестве исходных данных выбран образец интегральной микросхемы, выполненной полевой технологией; информационно-измерительная система построена на базе сканирующего электронного микроскопа КУКУ-8000 с управляющим компьютером. В результате получены изображения структур элементов полевых транзисторов в составе интегральной микросхемы, на основе которых рассчитан коэффициент запыленности. Полученные результаты показали, что с помощью сканирующей электронной микроскопии возможно проведение анализа технологии изготовления полупроводниковых приборов, определение последовательности выполнения и особенности технологических операций, выявление причин брака продукции с целью оптимизации технологических процессов изготовления.

**Ключевые слова:** сканирующая электронная микроскопия, сечение, подзатворный диэлектрик, шина, коэффициент запыленности, реверс-инжиниринг

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития «Учебный дизайн-центр «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы» (соглашение от 05.03.2024 г. № 075-02-2024-1513) в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

**Для цитирования:** Малаханов А.А., Пугачев А.А., Маркова В.К. Применение сканирующей электронной микроскопии в реверс-инжиниринге электронной компонентной базы // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-4-12.

Original article

Open Access Article

# APPLYING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY IN REVERSE ENGINEERING OF ELECTRONIC COMPONENT BASE

Alexey A. Malakhanov<sup>1</sup>, Alexander A. Pugachev<sup>2</sup>, Valeria K. Markova<sup>3</sup>✉

<sup>1, 2, 3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> malakhan@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

<sup>2</sup> alexander-pugachev@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

<sup>3</sup> markovaic4499@mail.ru

**Abstract.** *The article shows the relevance of scanning electron microscopy in the problems of analysing and synthesising micro- and nanoscale structures of semiconductor devices. The aim of the article is to analyze the structure quality of semiconductor devices in integrated circuits, to restore the sequence of technological operations and reverse engineering. To achieve this goal, the following tasks are solved: dielectric and conductive structures of semiconductor devices in integrated circuits are studied, the results of measuring the linear dimensions of the semiconductor device elements are analyzed, the dustiness coefficient is calculated. The study applies the methods of a full-scale experiment, digital methods of processing graphic information. A sample of an integrated circuit manufactured using field technology is selected as the initial data; the information and measuring system is built on the basis of a KYKY 8000 scanning electron microscope with a control computer. As a result, images of the element structures of field-effect transistors in the integrated circuit are obtained, on the basis of which the dustiness coefficient is calculated. The results show that with the help of scanning electron microscopy it is possible to analyze the technology of manufacturing semiconductor devices, to determine the sequence of execution and features of technological operations, to identify the causes of product defects to optimize technological manufacturing processes.*

**Keywords:** scanning electron microscopy, section, gate dielectric, busbar, dustiness coefficient, reverse engineering

**Funding:** The work is carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project “Training of Personnel and Scientific Foundation for the Electronic Industry” of the state program of the Russian Federation “Scientific and Technological Development of the Russian Federation” in implementing the Development Program “Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base” (agreement No. 075-02-2024-1513 of 2024 March 05) at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bryansk State Technical University.

**For citation:** Malakhanov A.A., Pugachev A.A., Markova V.K. Applying Scanning Electron Microscopy in Reverse Engineering of Electronic Component Base. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-4-12.

## Введение

Совершенствование работы и повышение энергетической эффективности электронных и электротехнических изделий приводит к появлению новых требований как к силовой части объектов управления, так и к их системам управления [1, 2]. Развитие преобразовательной техники и систем управления электронными преобразователями требует наличия современной, надежной, недорогой и доверенной электронной компонентной базы [3, 4]. В связи с уходом с рынка Российской Федерации ряда зарубежных компаний и поставщиков зарубежной электронной компонентной базы требуется замещение этой базы отечественными аналогами с идентичными характеристиками, отвечающих требованиям разработчиков электронной техники.

Для изготовления аналогов таких компонентов требуется изучение конструктивно-технологических и схемотехнических вариантов таких изделий, а также адаптация к технологическим возможностям, имеющихся на отечественных предприятиях, т.е. требуется провести реверс-инжиниринг электронных компонентов.

Одним из этапов реверс-инжиниринга является исследование и анализ микро- и наноразмерных структур полупроводниковых приборов.

Сканирующая электронная микроскопия находит широкое применение для исследования микрообъектов и элементов структур полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [5, 6]. Анализ изображений, полученных с помощью сканирующих электронных микроскопов (SEM), позволяет инженерам-конструкторам и технологам проводить детальные исследования структур и делать выводы об их качестве, наличии

дефектов, возможных отклонениях в процессе изготовления. Например, неровность краев металлических шин связана с параметрами фотолитографии и плазменного травления алюминия, структура зерен алюминия зависит от процесса осаждения и вжигания металла, профиль контактных окон может изменяться от способов травления контактов и осаждения металла [7, 8]. Особенно полезными эти данные становятся при сравнении результатов процессов, выполненных на разных установках и с разными по длительности процессами.

SEM позволяет изучать микро- и наноразмерные объекты при большем увеличении, значительно превышающим доступное для оптических микроскопов. В сочетании с возможностью поворачивать образец под различными углами, SEM становится незаменимым при исследовании структур, полученных в результате процессов фотолитографии, травления, нанесения и прочих операций [9]. Наличие дополнительной системы энергодисперсионного анализа в сканирующем микроскопе позволяет в дальнейшем оценить качественный и количественный состав материалов в исследуемых образцах.

В данной работе использование сканирующей микроскопии преимущественно направлено на анализ структуры полевого транзистора в составе интегральной микросхемы в целях изучения технологии формирования подзатворного диэлектрика и выполнения металлизации для последующего реверс-инжиниринга подобных структур в составе других микросхем.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Первой задачей SEM являлся анализ сечений (кросс-секций) интегральной микросхемы с транзисторными структурами. Метод получения сечений является разрушающим: в образце тем или иным способом формируется сечение в вертикальной плоскости, которое затем исследуется с помощью SEM. Такой способ позволяет получить наиболее ценную информацию об образце – взаимное расположение различных слоев и их поведение на рельефах предыдущих слоев.

Для изготовления и анализа сечений был выполнен скол пластины, со сформированными в ней структурами полевых транзисторов. Пластины «электронного» кремния обладают практически идеальной кристаллической структурой, поэтому при попытке разломать пластину или отдельный кристалл микросхемы, разрушение будет происходить в наиболее слабых кристаллографических плоскостях [10]. При использовании кремниевых пластин с ориентацией поверхности (100), такими плоскостями являются направления (110) (рис. 1). В результате скол можно провести строго горизонтально или вертикально.

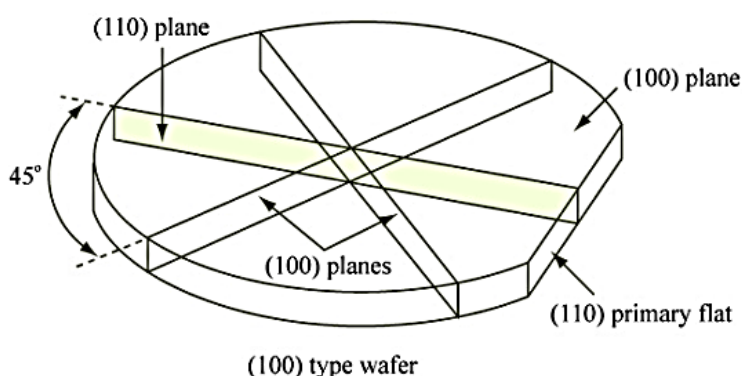
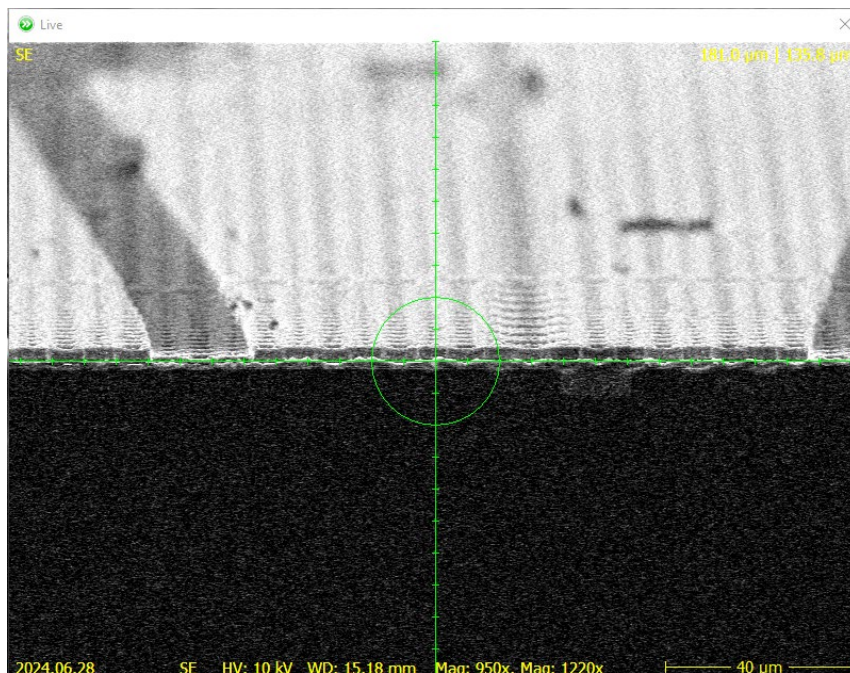


Рис. 1. Расположение кристаллографических плоскостей кремниевых пластин [10]  
 Fig. 1. The position of crystallographic planes of silicon wafers [10]

После формирования скола пластины получено изображение общего вида сечения длиной 40 мкм (рис. 2). Данное изображение получено с помощью датчика вторичных электронов SE (secondary electrons) при ускоряющем напряжении зонда HV (high voltage) 10 кВ. Увеличение MAG (magnification) составило 1220 раз при рабочем расстоянии WD (working

distance) в 15,18 мм. Рабочее расстояние представляет собой расстояние между точкой фокусировки луча зонда и датчиком вторичных электронов. Следовательно, чем меньше рабочее расстояние, тем больше увеличение и качество получаемого изображения, поскольку большее количество вторичных электронов достигнет датчика.



**Рис. 2. Общий вид исследуемого сечения пластины**  
*Fig. 2. A view of the investigated section of the plate*

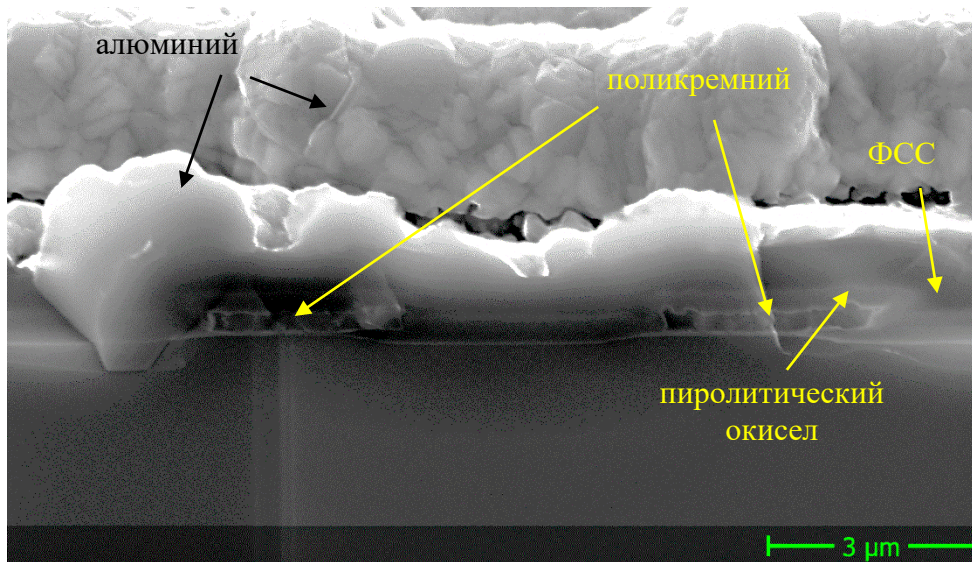
Управляя увеличением и фокусным расстоянием сканирующего микроскопа, выявлено подходящее для исследования сечение полевого транзистора с четко различимыми структурами и технологическими слоями металлизации алюминия, окислов, ФСС (рис. 3).

Эти изображения представляют собой общий вид сечения полевого транзистора и не являются достаточно информативными для того, чтобы с их помощью можно было измерить толщину подзатворного диэлектрика. Поэтому дополнительно были проведены исследования с большим увеличением (89 000 раз) и большим ускоряющим напряжением зонда (15 кВ), а также было уменьшено до 9,4 мм рабочее расстояние между точкой фокусировки луча зонда и датчиком вторичных электронов. В результате этих исследований были выполнены замеры толщины слоя подзатворного диэлектрика на отрезке длиной 400 нм (рис. 4). Как можно увидеть, толщина подзатворного диэлектрика неравномерная и имеет значение толщины от 37 до 45 нм.

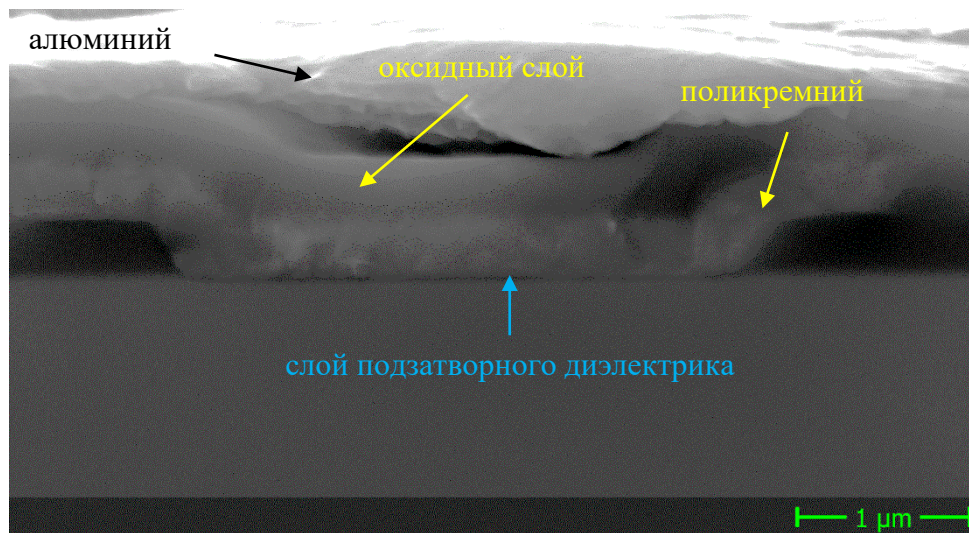
Второй задачей стало исследование поверхности кристалла интегральной микросхемы, а именно изучение качества металлизации. Работа по исследованию поверхности простая и выполняется достаточно быстро, но при этом она не дает полной информации о конструктивно-технологических особенностях образца и требуется проводить исследования кристалла под разными углами [11]. В рамках этих исследований поверхности кристаллов были измерены линейные размеры шин металлизации и рассчитаны коэффициенты запыленности металлических пленок.

Основное отличие этой задачи от предыдущей состоит в том, что необходимо проводить исследование проводящего материала, а ранее рассматривался непроводящий. Исследование проводящих материалов представляет собой более простую задачу, поскольку они содержат в себе большее количество свободных электронов, нежели непроводящие. В связи с этим сканирующий луч микроскопа выбивает с поверхности проводника большее количество вторичных электронов, а значит соответствующий детектор вторичных электронов получит на свой вход больше информации, нежели при сканировании непроводящего материала [12, 13].





a)



b)

Рис. 3. Изображения сечений полевых транзисторов (а, б), сделанные с помощью сканирующего микроскопа

Fig. 3. Images of cross-sections of field-effect transistors (a, b) taken using a scanning microscope

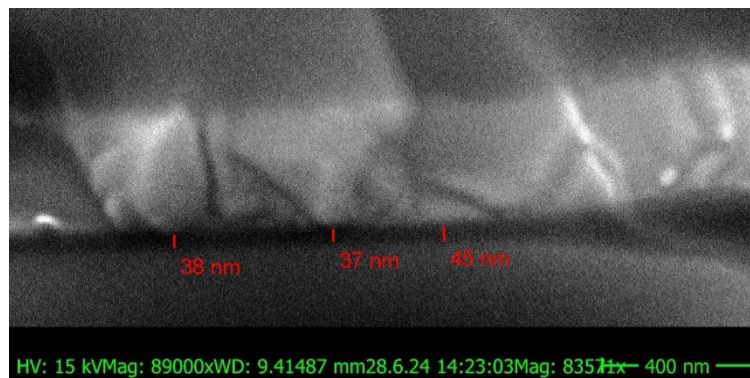
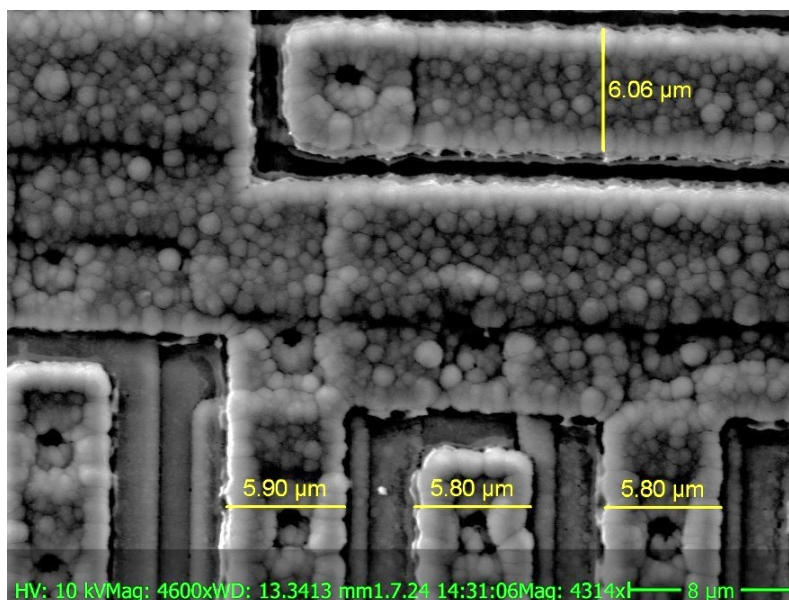


Рис. 4. Изображение подзатворного диэлектрика с размерами

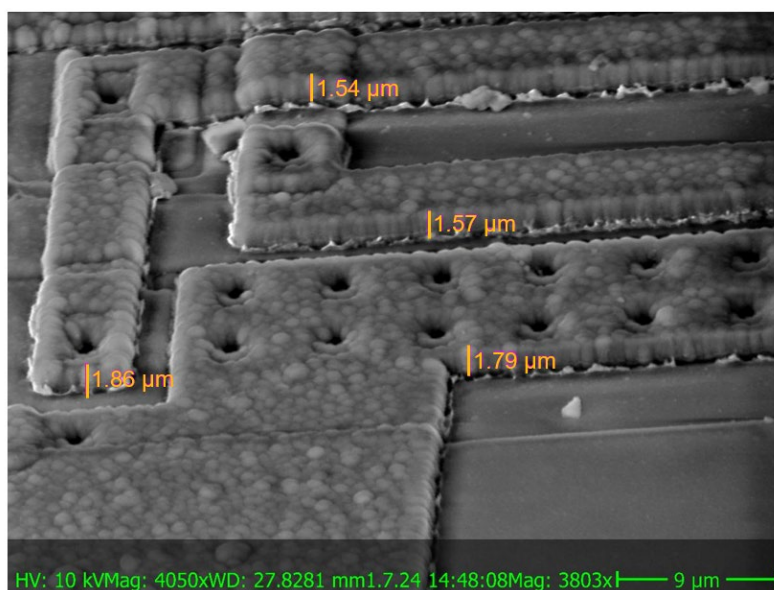
Fig. 4. An image of gate dielectric with dimensions

Для измерения ширины шин металлизации образец располагается перпендикулярно относительно сканирующего луча микроскопа. Результаты измерения ширины шин приведены на рис. 5.



**Рис. 5. Измерения ширины различных шин металлизации на поверхности пластины**  
**Fig. 5. Measurements of the width of various metallization buses on the surface of the plate**

Для измерения толщины шин металлизации образец располагался под углом  $45^\circ$  относительно сканирующего луча микроскопа. Результаты измерения толщины шин приведены на рис. 6.



**Рис. 6. Измерения толщины различных шин металлизации на поверхности пластины**  
**Fig. 6. Measurements of the thickness of various metallization buses on the surface of the plate**

Изображения получены при одинаковых ускоряющих напряжениях зонда сканирующего микроскопа (10 кВ), однако в первом случае было необходимо уменьшить рабочее расстояние (13,3 мм), чтобы получить большее увеличение, составившее 4600 раз.

На рис. 5 и 6 отчетливо видна структура слоя алюминия, из которого выполнены шины многоуровневой металлизации. Алюминий имеет неровную, зернистую структуру с перепадами высоты от 1,57 мкм до 1,86 мкм. Также отчетливо наблюдаются впадины, являющиеся контактными областями к элементам полупроводникового кристалла.

Вычисление коэффициента запыленности позволяет оценить качество нанесения металлических пленок и, следовательно, произвести контроль качества выпускаемой продукции. Коэффициент запыленности представляет собой отношение наименьшей толщины металлической пленки на изгибе к средней толщине металлической пленки (рис. 7).



Для того чтобы изделие отвечало требованиям качества, необходимо иметь коэффициент запыленности не менее 0,5.

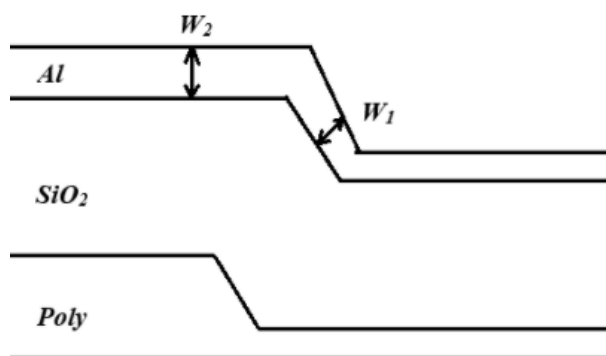


Рис. 7. Схематическое изображение для определения коэффициента запыленности  
 Fig. 7. A schematic representation for determining the dustiness coefficient

Из параметров металлической пленки, представленной на рис. 7, коэффициент запыленности  $k$  определится как:

$$k = \frac{W_1}{W_2} > 0,5. \quad (1)$$

Это связано с тем, что при слишком узких и тонких шинах металлизации возможны локальные перегревы структуры вследствие прохождения через них электрического тока. Также истончение шин приводит к их механическому разрушению (трещины, сколы, разрывы). Таким образом это может привести к ухудшению электрофизических параметров микросхемы или к выходу ее из строя.

Для вычисления коэффициента запыленности исследуемого образца получено изображение шины металлизации (рис. 8) при ускоряющем напряжении зонда 10 кВ и увеличении 8230 раз.

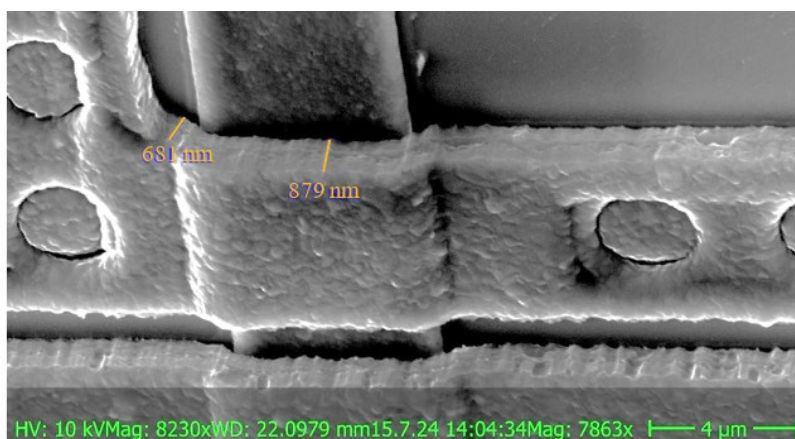
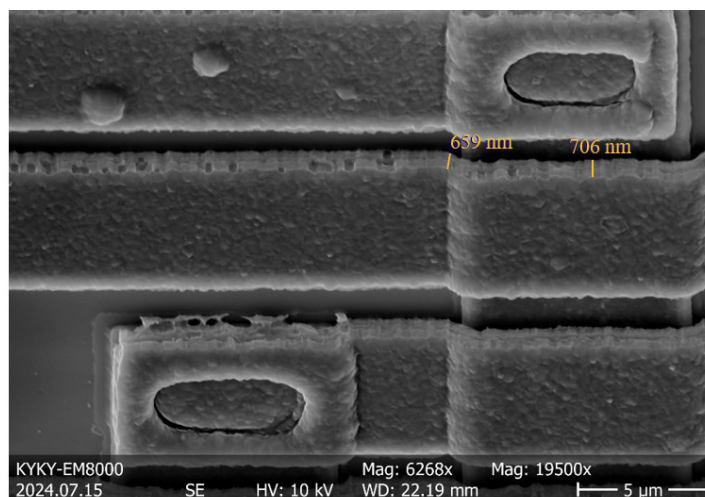


Рис. 8. Шина металлизации для измерения коэффициента запыленности  
 Fig. 8. The metallization bus for measuring dustiness coefficient

Из рис. 8 по выражению (1) вычислен коэффициент запыленности:

$$k = \frac{681 \cdot 10^{-9}}{879 \cdot 10^{-9}} \approx 0,77.$$

Чем ближе коэффициент запыленности к единице, тем качественнее выполнено напыление металла. Так, например, на рис. 9, полученном при ускоряющем напряжении 10 кВ и увеличении 19 500 раз, приведено изображение шины металла, для которой  $k \approx 0,93$ .



**Рис. 9. Шина металлизации для измерения коэффициента запыленности**  
**Fig. 9. The metallization bus for measuring dustiness coefficient**

Основываясь на данных микроскопических исследований с помощью SEM, можно выявить дефекты структур, обосновать параметры технологических процессов для качественного изготовления структур полупроводниковых приборов.

### Заклучение

В результате работы были получены изображения диэлектрических и проводящих полупроводниковых структур полевых транзисторов в составе интегральной микросхемы, определены линейные размеры элементов структур, что позволит более точно оценить параметры технологических процессов, обеспечивающих требуемый конструктивно-технологический вариант полупроводникового прибора при реверс-инжиниринге. Вычислен коэффициент запыленности металлических пленок, который является важным параметром для контроля качества и надежности металлизации.

Использование сканирующей электронной микроскопии в рамках выполнения реверс-инжиниринга позволяет анализировать технологию изготовления полупроводниковых приборов, определять последовательность выполнения и особенности технологических операций, выявлять причины брака продукции с целью оптимизации технологических процессов изготовления.

### Список источников:

1. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы «синхронный генератор – преобразователь частоты – синхронный двигатель» // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – № 3. – С. 89-96.
2. Андриянов А.И. Расчет оптимальных параметров систем управления нелинейными динамическими процессами импульсных преобразователей напряжения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 4. – С. 87-96.
3. Беспалов А.В., Гераськин А.А., Смирнов Д.О. Сертификация – инструмент обеспечения доверенности // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1(119). – С. 206-208.
4. Горбунов М.С. Платформенные решения для создания доверенной отказоустойчивой электронной компонентной базы // Безопасность информационных технологий. – 2022. – Т. 29, № 2. – С. 85-99.
5. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 249 с.

### References:

1. Chuprina N.V., Pugachev A.A. Simulation of the "Synchronous Generator – Frequency Converter – Synchronous Motor" System. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;3:89-96.
2. Andrianov A.I. Calculation of Optimal Control System Parameters for Nonlinear Dynamic Processes of Pulse Voltage Converters. Automation and Modelling in Design and Management. 2022;4:87-96.
3. Bepalov A.V., Geraskin A.A., Smirnov D.O. Certification as a Tool for Securing a Trust. Nanoindustry. 2023;16(S9-1(119):206-208.
4. Gorbunov M.S. Platform Solutions for the Design and Development of Reliable Trusted Electronic Components. IT Security (Russia). 2022;29(2):85-99.
5. Shindo D., Oikawa T. Analytical Transmission Electron Microscopy. Moscow: Tekhnosfera; 2006.



6. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: РАН ИФМ, 2004. – 114 с.

7. Булатов А.Н., Неволин В.К. Анодное окисление тонких пленок алюминия в атомно-силовом микроскопе // Микросистемная техника. – 2003. – № 11. – с. 42-44.

8. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 414 с.

9. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 152 с.

10. Feenstra R.M., et al. Recent Development in Scanning Tunneling Spectroscopy of Semiconductor Surfaces. Appl. Phys., 2001.

11. Рыков С.А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. – СПб: Наука, 2001. – 52 с.

12. Sakurai T. Advances in Scanning Probe Microscopy. Springer Science & Business Media, 2012.

13. Бахтизин Р.З., Галлямов Р.Р. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии, Уфа, РИО БашГУ. – 2003. – 82 с.

6. Mironov V.L. Fundamentals of Scanning Probe Microscopy. Nizhny Novgorod: IPM RAS; 2004.

7. Bulatov A.N., Nevolin V.K. Anodic Oxidation of Thin Aluminium Films in an Atomic Force Microscope. Microsystems Technology. 2003;11:42-44.

8. Gusev A.I. Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit; 2005.

9. Nevolin V.K. Probe Nanotechnologies in Electronics. Moscow: Tekhnosfera; 2005.

10. Feenstra RM, et al. Recent Development in Scanning Tunneling Spectroscopy of Semiconductor Surfaces. Applied Physics. 2001.

11. Rykov S.A. Scanning Probe Microscopy of Semiconductor Materials and Nanostructures. Saint Petersburg: Nauka; 2001.

12. Sakurai T. Advances in Scanning Probe Microscopy. Springer Science & Business Media; 2012.

13. Bakhtizin R.Z., Gallyamov R.R. Physical Foundations of Scanning Probe Microscopy. Ufa: Publishing House of Bashkir State University; 2003.

### **Информация об авторах:**

#### **Малаханов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, руководитель учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы», заведующий кафедрой «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета

#### **Пугачев Александр Анатольевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета.

#### **Маркова Валерия Константиновна**

стажер учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс инжиниринг электронной компонентной базы», студент Брянского государственного технического университета

### **Information about the authors:**

#### **Malakhanov Aleksey Alekseevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, Head of the Department of Electronic, Radio-Electronic and Electrical Engineering Systems of Bryansk State Technical University

#### **Pugachev Alexander Anatolyevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Turbine Engineering, Electrical and Thermal Engineering of Bryansk State Technical University

#### **Markova Valeria Konstantinovna**

Intern at the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, student of Bryansk State Technical University

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

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

**Статья поступила в редакцию 10.07.2024; одобрена после рецензирования 31.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.**

**The article was submitted 10.07.2024; approved after reviewing 31.07.2024; accepted for publication 14.08.2024.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.8

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ МЕДТЕХНИКИ

Елена Викторовна Нестерова<sup>1✉</sup>, Светлана Васильевна Игрунова<sup>2</sup>,  
Иван Николаевич Григоренко<sup>3</sup>, Дарья Александровна Иващук<sup>4</sup>,  
Валерий Георгиевич Нестеров<sup>5</sup>, Елена Вячеславовна Калюжная<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород, Россия

<sup>1</sup> nesterova@bsu.edu.ru

<sup>2</sup> igrunova@bsu.edu.ru

<sup>3</sup> igrunova@bsu.edu.ru

<sup>4</sup> 1302561@bsu.edu.ru

<sup>5</sup> cireto@gmail.com

<sup>6</sup> kaludgnaya@bsu.edu.ru

**Аннотация.** В ходе исследования были выявлены проблемы, с которыми сталкиваются современные медицинские учреждения – в частности, клиника «Медицина». Эти трудности обусловлены управлением, техническим обслуживанием и пользовательской эксплуатацией медицинских устройств. Чтобы их преодолеть, нужно пересмотреть систему обслуживания и ремонта медицинской техники, а также обеспечить непрерывное повышение квалификации сотрудников, ответственных за эксплуатацию оборудования. Была предложена информационная модель с включающая технический инструментарий для прогнозирования, такой как экспоненциальное сглаживание. На основе исследования была создана программная реализация информационной системы и прогнозирующего модуля. Эти разработки были протестированы в работоспособных условиях ЛПУ «Медицина». Благодаря построенному прогнозу срока службы деталей анализатора РНОХ Plus удалось скорректировать в меньшую сторону закупку расходных частей.

**Ключевые слова:** управляющая система, временной ряд, медицинское оборудование, информационная модель

**Для цитирования:** Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Григоренко И.Н., Иващук Д.А., Нестеров В.Г., Калюжная Е.В. Автоматизация прогнозирования неисправностей медтехники // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 13-22. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22.

Original article

Open Access Article

## AUTOMATION OF MEDICAL EQUIPMENT FAILURE FORECASTING

Elena V. Nesterova<sup>1✉</sup>, Svetlana V. Igrunova<sup>2</sup>, Ivan N. Grigorenko<sup>3</sup>, Darya A. Ivashchuk<sup>4</sup>,  
Valery G. Nesterov<sup>5</sup>, Elena V. Kalyuzhnaya<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

<sup>1</sup> nesterova@bsu.edu.ru

<sup>2</sup> igrunova@bsu.edu.ru

<sup>3</sup> igrunova@bsu.edu.ru

<sup>4</sup> 1302561@bsu.edu.ru

<sup>5</sup> cireto@gmail.com

<sup>6</sup> kaludgnaya@bsu.edu.ru

**Abstract.** The study identifies the problems faced by modern medical institutions, in particular, the Meditsina clinic. The management, maintenance, and user operation of medical devices cause these difficulties. To overcome them, it is necessary to revise the system of maintenance and repair of medical equipment, as well as to ensure continuous professional development of the employees responsible for the equipment operation. The paper proposes an information

*model that includes technical tools for forecasting, such as exponential smoothing. The authors create software implementation of the information system and forecasting module based on the research; test these developments in the working conditions of the medical and preventive institution Meditsina. Thanks to the constructed forecast of the service life of the PHoX Plus analyzer parts, it is possible to adjust the purchase of consumables downwards.*

**Keywords:** control system, time series, medical equipment, information model

**For citation:** Nesterova E.V., Igrunova S.V., Grigorenko I.N., Ivashchuk D.A., Nesterov V.G., Kalyuzhnaya E.V. Automation of Medical Equipment Failure Forecasting. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 13-22. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-13-22.

## Введение

Информационные технологии в медицине предназначены для улучшения ухода за пациентами, повышая при этом эффективность системы здравоохранения.

Современное медицинское оборудование – это физическая подгруппа цифровых технологий, включающая в себя любой аппарат, машину, инструмент, имплантат, который используется для лечения, предотвращения, диагностики, смягчения или лечения заболеваний и других состояний здоровья.

Нехватка запасных частей для критически важного оборудования недопустима, однако бюджетные ограничения затрудняют планирование запасов, также негативно сказываются и экономико-политические сложности, влияющие на поставки запчастей, вызывая задержки в обслуживании и ремонте. На текущий момент в сфере здравоохранения используются различные информационные системы, но они не адаптированы под обслуживание современного медицинского оборудования [1, 2]. Из-за этого многие медицинские учреждения сталкиваются с тем, что не могут своевременно обслуживать и ремонтировать технику. Это может приводить к сбоям в работе, дополнительным расходам на ремонт и замену оборудования, а также к финансовым потерям медицинских учреждений. [3, 4]. Медицинская организация определяется как система, в которой бизнес-процессы по обслуживанию оборудования – планирование, обслуживание, распределение – автоматизированы и интегрированы в рамках единой информационной системы медицинской организации. Соединение оборудования, отделений, систем в общую сеть позволит взаимодействовать между собой всем структурным подразделениям и участникам процесса обеспечения функционирования медицинского учреждения, влиять друг на друга автоматически и минимизировать простои, а также максимизировать обслуживание пациентов, тем самым повышать экономическую эффективность деятельности медицинской организации [5 – 8].

## Материалы, модели, эксперименты и методы

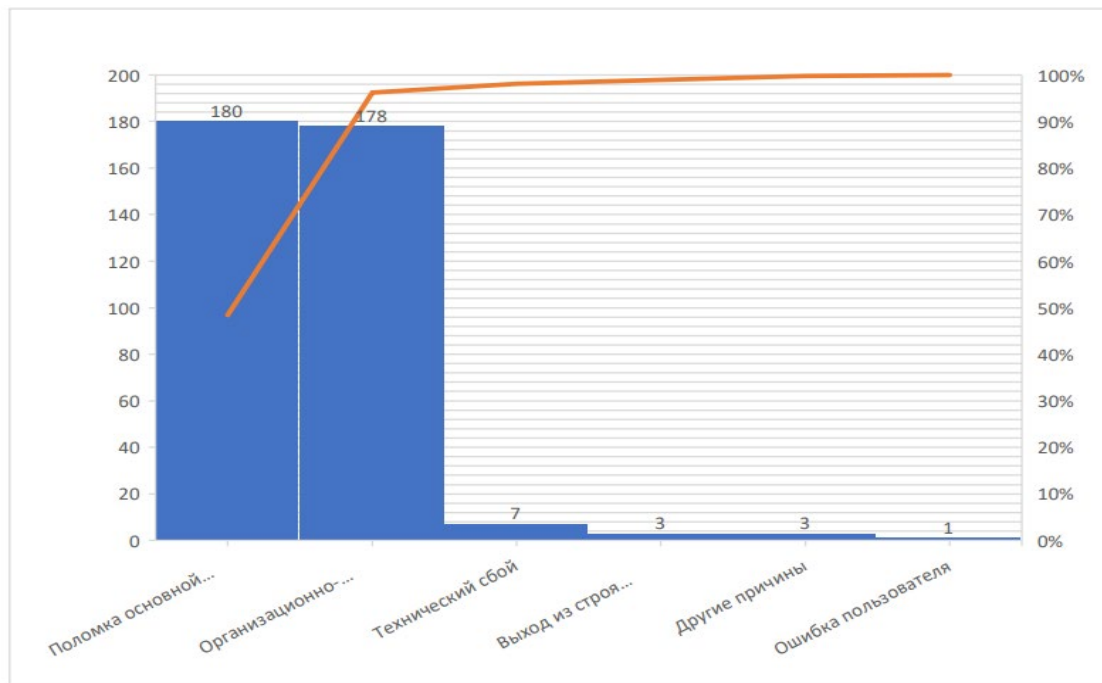
Исследование проводилось в клинике «Медицина» (г. Москва) в рамках магистерской диссертации в НИУ «БелГУ» (г. Белгород).

Целью исследования является совершенствование процесса технической эксплуатации медицинского оборудования путем разработки модели прогнозирования срока службы медтехники для автоматизации процессов учета обслуживания и ремонта медицинского оборудования.

На основании исследований И.Г. Новокрещёнова, А.Н. Островского, Е.П. Ковалёва, Н.Г. Кислинского, А.В. Рачинских, А.Д. Стрекаловской, А.Г. Тумашевой [9] посвящённых актуальным проблемам обслуживания медоборудования и анализа материала, связанного с эксплуатацией и ремонтом медицинского оборудования в клинике АО «Медицина» города Москва за 2020 – 2023 годы была проведена классификация неисправностей по процентному соотношению, продолжительности и важности решения, показанная на рис. 1.

Проанализировав диаграмму максимальных сроков простоя по дням и процентного соотношения на основе диаграммы Парето, видим, что такие факторы как отсутствие на рынке сервисных центров завода-изготовителя, увеличения периода поставки запасных частей для устройств влияют на простои медицинской аппаратуры в медицинских учреждениях. В свою очередь на эксплуатацию оборудования так же влияют как внутренние, так и внешние организационные изменения. Медицинское оборудование производителей GE, Siemens,

Philips имеет различные встроенные телеметрические датчики, но свободный анализ этой информации невозможен в связи с тем, что для неё необходим сервисный доступ. Монтаж дополнительных датчиков для мониторинга параметров работы является внесением конструктивных изменений в медицинское оборудование и снимает ответственность производителя за его безопасность и работоспособность. При эксплуатации аппаратуры собираются временные данные о замене запасных частей и числовые данные из актов о выполнении работ. Таким образом применяется комплексный прогноз, включающий качественный и количественный подходы.



**Рис. 1. Диаграмма причин простоя медицинского оборудования**  
**Fig. 1. Diagram of reasons for maximum downtime of medical equipment**

Значение интенсивности и периодичности оказывает влияние период работы основных узлов медицинской техники. Во время технического обслуживания инженер сервисной службы смотрит исторические данные о работе аппарата и оценивает частоту эксплуатации за интервал между прошлым и текущим техническим обслуживанием. Эти данные имеют свойство временного ряда, зависящего от частоты эксплуатации оборудования и трендовый характер.

Для сокращения простоя, связанного с техническим сбоем аппарата, необходимо создание базы знаний с инструкциями и подсказками, основанными на данных, связанных с выходом из строя расходных частей, основных узлов и длительностью ожидания ремонта.

Анализ временных рядов в направлении медицинских исследований рисков сложных технических систем не являются новыми, но теория построения методов прогнозирования неисправностей медицинского оборудования открыта для исследования.

Была предложена информационная модель прогнозирования, включающая экспоненциальное сглаживание временного ряда и, позволяющая автоматизировать процессы технического обслуживания и ремонта медицинского оборудования в медицинских учреждениях.

В рамках исследования также была разработана информационная система, направленная на сокращение времени простоя оборудования и, соответственно, повышение эффективности работы медицинских учреждений. В клинике «Медицина» используется информационная система Visual FM, разработанная немецкой фирмой Лой энд Хутц. Эта система успешно работает уже более десяти лет, однако производитель ушёл с российского рынка и больше не поддерживает её. Это представляет собой основное ограничение для обновления системы и её адаптации к новым требованиям.

На рис. 2 представлена функциональная модель процесса подачи заявки на ремонт «AS IS».



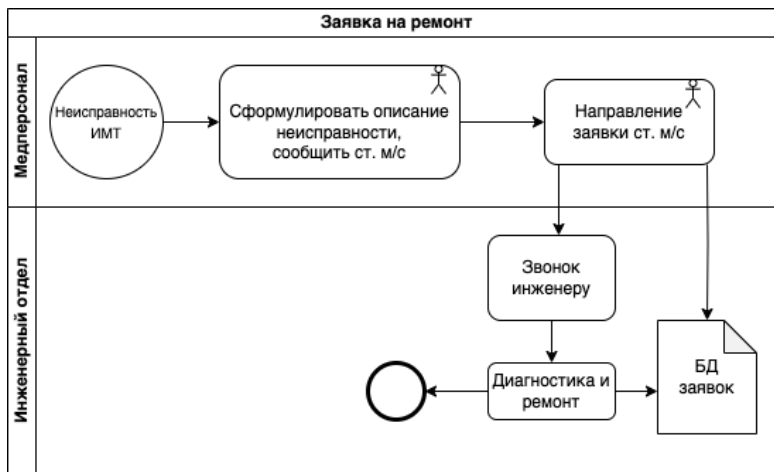


Рис. 2. Функциональная модель процесса подачи заявки  
 Fig.2. Functional model of the application process

В данном алгоритме подачи заявок есть существенный минус – «эффект бутылочного горлышка». Проблема заключается в том, что взаимодействие с сервисной службой осуществляется через старшую медсестру. Если возникают проблемы, и информация о природе неисправности не может быть передана старшей медсестре, медицинский персонал сообщает по неофициальным каналам связи. Инженеру сложно определить из нескольких задач по восстановлению работоспособности аппарата, какую выполнять в первую очередь. Помимо этого, из-за отсутствия у персонала в доступной близости инструкции по эксплуатации высокотехнологичной аппаратуры, позволяющей оперативно решать некоторые причины простоя оборудования, например, перезагрузкой устройства. В следствие чего время, затраченное на организацию вызова инженера, время его пути многократно превышает время работы для решения причин простоя.

Для снижения времени реагирования инженера по вопросам медицинского оборудования была разработана функциональная модель процесса подачи заявки на ремонт «ТО ВЕ», полученная в ходе моделирования информационной системы, показанная на рис. 3.

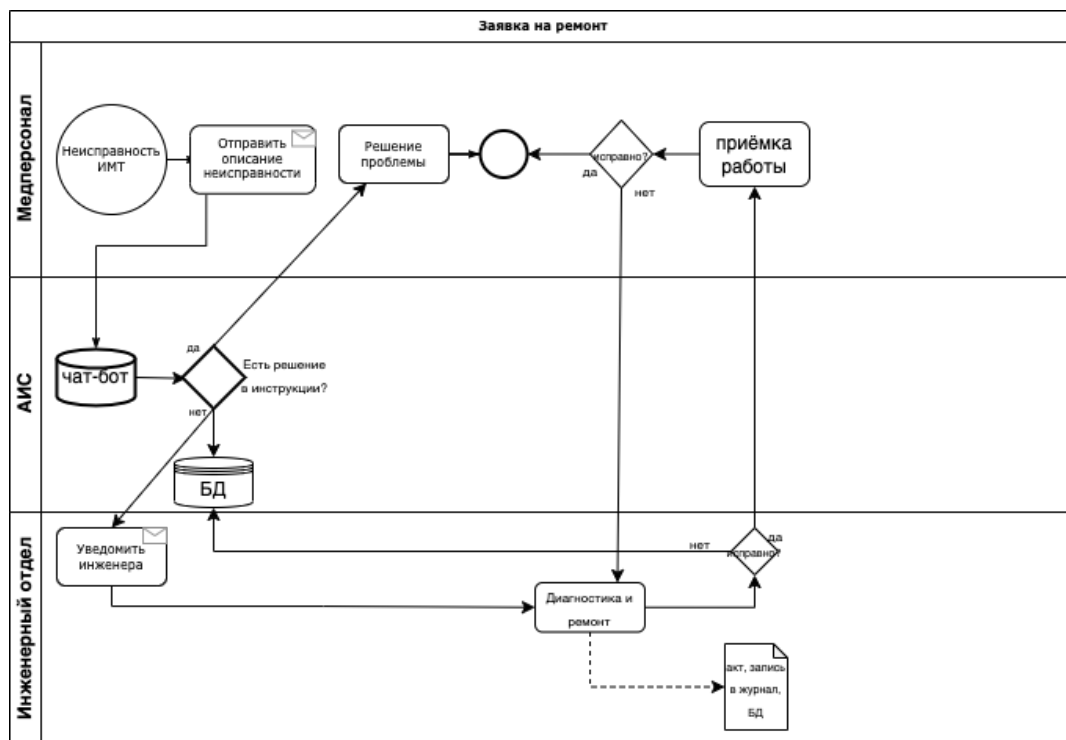


Рис. 3. Функциональная модель процесса подачи заявки на ремонт «ТО ВЕ»  
 Fig. 3. Functional model of the «TO VE» repair application process

Для решения задачи прогнозирования срока службы был выбран в качестве примера анализатор газов крови и электролитов. Это реанимационное оборудование, благодаря которому определяются ключевые показатели состояния пациентов. В клинике налажена плановая госпитализация и коечный оборот примерно одинаков и с учетом фиксированной периодичности проведения анализов трендовая и сезонная компонента малозначительны.

## Результаты

Для разработки автоматизированной системы прогнозирования неисправностей медицинской техники необходимо разработать структуру, основанную на принципах иерархичности и декомпозиции конструкции. Эти принципы предполагают разделение медицинского аппарата на отдельные сборочные единицы. Такой подход позволяет прогнозировать срок службы каждого блока и оперативно заменять их на новые идентичные, что упрощает ремонт оборудования.

На рис. 4 представлен алгоритм модели прогнозирования отказов медицинского оборудования. Модель опирается на срок службы компонентов и конструктивные принципы медицинской техники.

Благодаря возможности предсказать срок службы отдельных блоков, можно спрогнозировать дату выхода из строя всего аппарата. Для этого используются существующие модели анализа временных рядов. На основании заявленного и реального сроков службы деталей оборудования были использованы модели экспоненциального сглаживания и взвешенного среднего скользящего [10 – 13]. Для этого выделено две выборки: первая выборка бралась для детали с большим сроком годности, а вторая с малым сроком годности.

Первая выборка включала детали, которые не поставляются партией и их качество может отличаться в зависимости от компонентов и сборки. Во вторую входили значения, характеризующие детали, имеющие малый срок эксплуатации, что позволило использовать больше исторических данных для анализа.

Как мы видим по табл. 1, некоторые позиции выходят из срока службы, заявленного производителем и тем самым, спустя некоторое время, формируется профицит запаса деталей с истекающим сроком годности. Получив прогнозное значение срока службы, мы можем вычислить погрешность прогноза. Для этого мы рассчитаем разницу между прогнозным значением и реальным сроком службы, а затем определим эту разницу в процентах. В качестве коэффициента важности последнего события мы используем значение 0,75. Мы выбрали это значение методом проб и ошибок, сравнив результаты прогнозирования при разных коэффициентах. В результате мы определили, что коэффициент 0,75 обеспечивает наименьшую ошибку прогнозирования методом экспоненциального сглаживания. Поэтому мы считаем его оптимальным для использования в прогнозе.

Для расходных материалов, по которым собрано достаточное количество исторических данных, предлагается применить модель временного ряда с экспоненциальным сглаживанием. Для этого определяется как скользящее среднее между средним сроком службы и наиболее ранним значением (1).

$$Y_t^* = \alpha Y_{t-1} + (1 + \alpha) Y_{t-1}^*, \quad (1)$$

где  $Y_t^*$  – прогнозируемое значение;  $\alpha$  – коэффициент сглаживания;  $Y_{t-1}^*$  – фактические данные предыдущего периода срока службы детали узла, предоставляемые сервисной службой.

Рассчитаем предыдущий прогноз для электрода РСО2 по формуле (1), при условии, что  $\alpha = 0,75$ :

$$Y_t^* = 0,75 \cdot 740 + (1 + 0,75) \cdot 622 = 711. \quad (2)$$

Последний срок службы электрода РСО2 равен:

$$Y_t^* = 0,75 \cdot 740 + (1 + 0,75) \cdot 679 = 725. \quad (3)$$

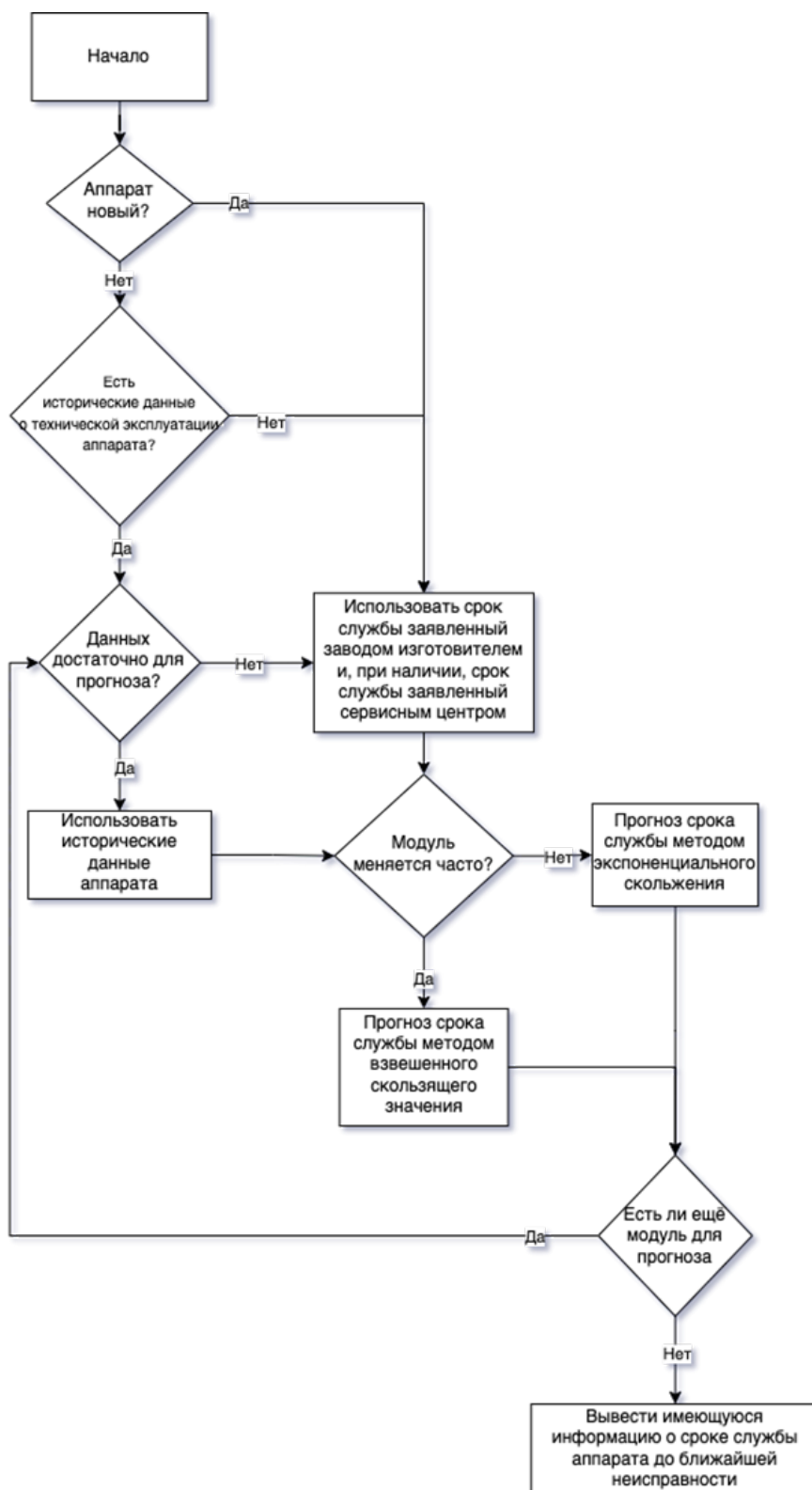


Рис. 4. Алгоритм прогноза  
 Fig. 4. The forecast algorithm

Относительная ошибка реального последнего срока службы и прогнозируемого методом экспоненциального сглаживания значения равна 0,5 %. Прогнозом высокой точности является прогноз с погрешностью до 5 %. От 5 до 10 % прогноз является допустимым.

Этот метод можно применить к остальным значениям электродов. Результаты расчётов представлены в табл. 1.

## Результаты прогноза методом экспоненциального сглаживания

Table 1

*Forecast results using exponential smoothing method*

Название деталей	Средний срок работы, дней	Прогноз срока службы $t$ , дней	Срок службы контроль $t$ , дней	Относительная ошибка, %
Электрод Лас	365...1095	1041	1103	5
Электрод GLU	365...1460	1443	1489	3
Электрод REF	730...1095	1108	1150	3
Электрод рН	365...730	797	810	2
Электрод PCO2	365...730	740	721	0,5
Электрод Na+	365...730	707	716	1
Электрод SO2	365...1095	985	1010	1

Коэффициент, применяемый в экспоненциальном скользящем и равный 0,75, показал высокую точность прогноза. Для электрода типа PO2 точность прогноза срока службы может быть недостаточно высокой, так как он имеет мало исторических данных. Однако если мы будем анализировать больше электродов этого типа и получим больше исторических данных, то сможем повысить точность прогноза. Данный метод также может быть использован для других расходных материалов или модулей биотехнических систем, которые обладают относительно редкой заменой по сравнению с их общим сроком службы. Однако точность прогнозирования для таких систем может варьироваться.

В результате расчета получен прогноз на последнюю замененную деталь со средней относительной ошибкой не более пяти процентов. Выбилась из списка мембрана лактата, но у нас дискретность измерения 1 сутки. В табл. 2 показаны результаты прогноза методом взвешенного среднего скользящего.

Таблица 2

## Результаты прогноза методом взвешенного среднего скользящего

Table 2

*Forecast results using the weighted moving average method*

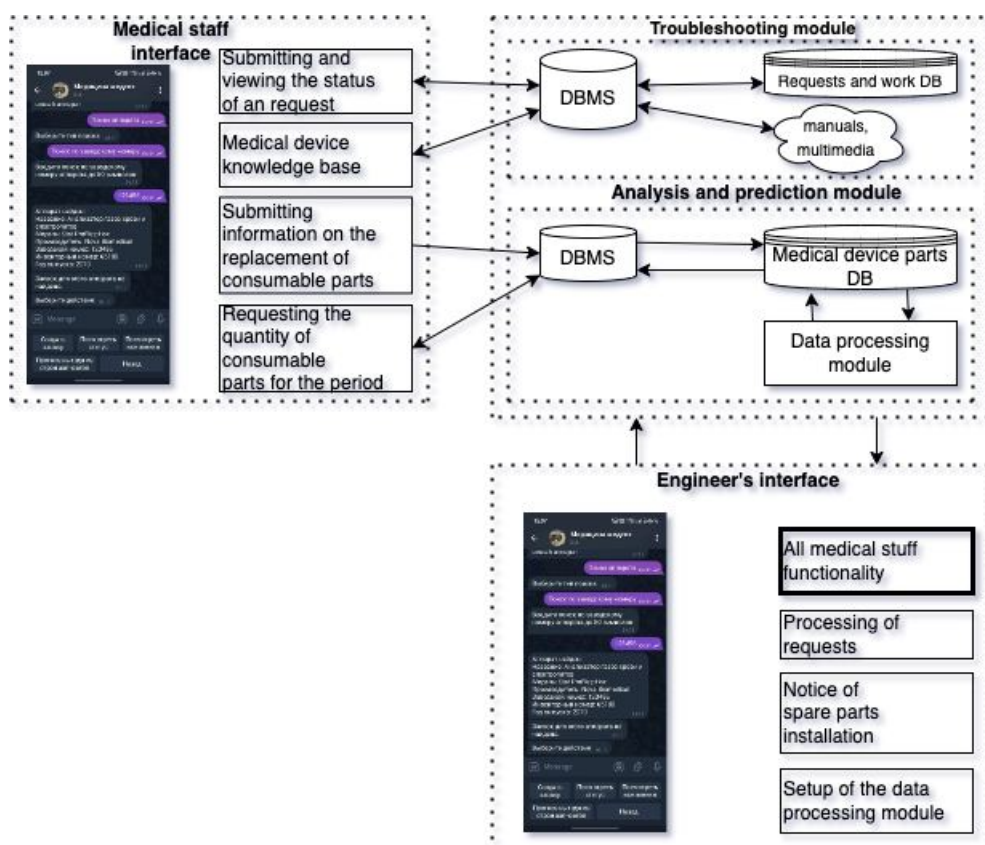
Название	Срок службы $t-3$ , дней	Срок службы $t-2$ , дней	Срок службы $t-1$ , дней	Прогноз срока службы $t$ , дней	Срок службы контроль $t$ , дней	Относительная ошибка, %
К+ эл-д	343	338	350	345	347	0,5
PCO2 мем.	45	51	48	48,3	46	5
Лас мем.	12	11	13	12,2	13	6,5
GLU мем.	42	45	44	43,9	43	2
PO2 мем.	50	47	55	46,6	48	3

В среднем относительная погрешность составляет 31,4 %. По словам медицинского персонала, анализатор газов крови и электролитов используется одинаково часто, при этом нет сезонных или трендовых изменений в использовании прибора.

Анализ количественных данных показывает явное превышение срока службы расходных деталей как при краткосрочном, так и при долгосрочном использовании.

*Проектирование информационной системы.* Архитектура системы состоит из интерфейса инженера и пользователя, модулей заявок, базы знаний и прогнозирования. Интерфейс представлен в виде чат бота. Правее мы видим бизнес-процесс, в котором он встроен. На рис. 5 представлена концептуальная модель информационной системы.





**Рис. 5. Концептуальная модель информационной системы**  
**Fig. 5. The conceptual model of the information system**

Основная часть АИС представляет из себя совокупность модулей подачи заявок для диагностики и ремонта медицинского оборудования, базы знаний с пользовательскими материалами, модуль анализа и прогнозирования срока службы установленных запасных частей [14, 15].

Среда разработки Rucharm поддерживает дополнительные инструменты, необходимые для добавления нового аппарата и меню поиска аппарата с подачей заявки на ремонт. Работа методов, в зависимости от типа оборудования. Использовались библиотеки для прогнозирования, для работы с Telegram Messenger и библиотека для SQL базы данных [16, 17].

Результаты исследования показали, что программная реализация информационной системы и модуля прогнозирования, апробация в условиях ЛПУ АО «Медицина», включающая модель прогноза срока службы деталей анализатора РНОХ Plus, оказалась эффективна. В результате удалось скорректировать в меньшую сторону закупку расходных частей на 4-й квартал 2023 года. Заявки на ремонт, поданные через чат-бот, оказались намного информативнее и точнее других способов информирования.

#### Список источников:

1. Проблемы обеспечения работоспособности медицинского оборудования в условиях модернизации здравоохранения / И.Г. Новокрещёнов, А.Н. Островский, И.В. Новокрещёнов, Е.П. Ковалёв / Бюллетень медицинских Интернет-конференций. – 2013. – Т. 3. – № 12.
2. Проблемы обеспечения работоспособности медицинского оборудования в условиях модернизации здравоохранения / Новокрещёнова И.Г. и др. // Бюллетень медицинских интернет-конференций. – Общество с ограниченной ответственностью «Наука и инновации». – 2013. – Т. 3. – №. 12. – С. 1343-1347.

#### References:

1. Novokreshchenov I.G., Ostrovsky A.N., Novokreshchenov I.V., Kovalev E.P. Problems of Ensuring the Operability of Medical Equipment in the Context of Healthcare Modernization. Bulletin of Medical Internet Conferences. 2013;3:12.
2. Novokreshchenov IG, et al. Problems of Ensuring the Operability of Medical Equipment in the Context of Healthcare Modernization. Bulletin of Medical Internet Conferences. Science and Innovations LTD. 2013;3(12):1343-1347.

3. Анализ удовлетворенности пациентов доступностью и качеством медицинской помощи в сельском здравоохранении региона / Еремина М.Г. и др. // Эффективный менеджмент здравоохранения: стратегии инноваций. – 2022. – С. 91.
4. Морозов А.И., Рыков В.В. Обслуживание и ремонт медицинской техники. – М.: Медицина, 2018. – 328 с.
5. Батурин Ю.Н., Котов В.А. Медицинская техника и технологии. – СПб.: Питер, 2020. – 384 с.
6. Сидоров И.В. Техническое обслуживание медицинской техники: проблемы и перспективы // Медицинская техника. – 2019. – № 4. – С. 3-8.
7. Сергеев А.А., Шумилов В.М. Современные подходы к ремонту и обслуживанию медицинской техники // Технологии и инновации. – 2017. – №6. – С. 56-62.
8. Попов П.А., Кузнецов А.А. Стандартизация и сертификация медицинской техники. – М.: Медицина, 2019. – 480 с.
9. Мировые тренды цифровой трансформации отрасли здравоохранения / П.С. Пугачев, А.В. Гусев, О.С. Кобякова и др. // Национальное здравоохранение. – 2021. – Т. 2. – № 2. – С. 5-12.
10. Кузнецов О.Ю. Соловьев Н.А. Актуальные проблемы и пути решения организации технического обслуживания и ремонта медицинского оборудования // Шаг в науку. – 2020. – №4.
11. Амоян Э.Ф., Калинина В.А. Оптимизация использования медицинского оборудования в лечебно-профилактических учреждениях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №11 (4). – С. 590-591.
12. Shumak K.D. Mathematical methods forecasting failures of medical equipment // Scientific review. Technical sciences. – 2017. – №1. – С. 99-101.
13. Ван Квонг Сай, Щербakov М.В. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – №1 (45). – С. 33-44.
14. Shevchenko I.V., Ershov A.P. Some models of time series analysis and prediction // System Informatics. – 2013. – № 2.
15. Егоров Д.Б., Захаров С.Д., Егорова А.О. Современные методы анализа и прогнозирования временных рядов и их применение в медицине. – 2020. – №1.
16. Управление медицинским оборудованием при разработке электронного журнала его технического обслуживания / Л.А. Басова, Н.О. Лабутина, М.Н. Аликберова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №5 (119).
17. Иванов И.В., Астапенко Е.М. Обеспечение безопасности обращения медицинских изделий в медицинской организации // Вестник Росздравнадзора. – 2018. – №1. – С.105-109.
3. Eremina MG, et al. Analysis of Patient Satisfaction With the Availability and Quality of Medical Care in Rural Healthcare of the Region. In: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference on Effective Healthcare Management: Innovation Strategies: 2022. p. 91.
4. Morozov A.I., Rykov V.V. Maintenance and Repair of Medical Equipment. Moscow: Medicine; 2018.
5. Baturin Yu.N., Kotov V.A. Medical Equipment and Technologies. Saint Petersburg: Piter; 2020.
6. Sidorov I.V. Medical Equipment Maintenance: Problems and Prospects. Biomedical Engineering. 2019;4:3-8.
7. Sergeev A.A., Shumilov V.M. Modern Approaches to Repair and Maintenance of Medical Equipment. Technologies and Innovations. 2017;6:56-62.
8. Popov P.A., Kuznetsov A.A. Standardization and Certification of Medical Equipment. Moscow: Medicine; 2019.
9. Pugachev PS, Gusev AV, Kobyakova OS, et al. Global Trends in the Digital Transformation of the Healthcare Industry. National Health Care (Russia). 2021;2(2):5-12.
10. Kuznetsov O.Yu. Soloviev N.A. Actual Problems and Solutions to the Organisation of Maintenance and Repair of Medical Equipment. Step to Science. 2020;4.
11. Amoyan E.F., Kalinina V.A. Optimization of the Use of Medical Equipment in Medical institutions. International Journal of Applied and Basic Research. 2016;11(4):590-591.
12. Shumak K.D. Mathematical Methods Forecasting Failures of Medical Equipment. Scientific Review. Technical Sciences. 2017;1:99-101.
13. Sai V.K., Shcherbakov M.V. Method for Predicting the Residual Resource Based on Processing Data From Multi-Object Complex Systems. Caspian Journal: Management and High Technologies. 2019;1(45):33-44.
14. Shevchenko I.V., Ershov A.P. Some Models of Time Series Analysis and Prediction. System Informatics. 2013;2.
15. Egorov D.B., Zakharov S.D., Egorova A.O. Modern Methods of Analysis and Forecasting of Time Series and Use in Medicine. 2020;1.
16. Basova LA, Labutina NO, Alikberova MN, et al. Management of Medical Equipment in Development of Electronic Journal of its Maintenance. International Research Journal. 2022;5(119).
17. Ivanov I.V., Astapenko E.M. Provision of Medical Products Circulation Safety in a Medical Organization. Vestnik Roszdravnadzora. 2018;1:105-109

### **Информация об авторах:**

#### **Нестерова Елена Викторовна**

кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических наук Белгородского государственного национального исследовательского университета

#### **Игрунова Светлана Васильевна**

кандидат социологических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических наук Белгородского государственного национального исследовательского университета

#### **Григоренко Иван Николаевич**

магистр направления подготовки 12.04.04 Белгородского государственного национального исследовательского университета

#### **Ивашук Дарья Александровна**

магистр направления подготовки 09.04.03 Белгородского государственного национального исследовательского университета

#### **Нестеров Валерий Георгиевич**

Кандидат медицинских наук, доцент кафедры медико-биологических дисциплин Белгородского государственного национального исследовательского университета

#### **Калюжная Елена Вячеславовна**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков и профессиональной коммуникации Белгородского государственного национального исследовательского университета

### **Information about the authors:**

#### **Nesterova Elena Viktorovna**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Information and Robotics Sciences of Belgorod National Research University

#### **Igrunova Svetlana Vasilievna**

Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor at the Department of Information and Robotics Sciences of Belgorod National Research University

#### **Grigorenko Ivan Nikolaevich**

Master of the training direction 12.04.04 of Belgorod National Research University

#### **Ivashchuk Darya Alexandrovna**

Master of the training direction 09.04.03 of Belgorod National Research University

#### **Nesterov Valery Georgievich**

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor at the Department of Medical and Biological Disciplines of Belgorod National Research University

#### **Kalyuzhnaya Elena Vyacheslavovna**

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Foreign Languages and Professional Communication of Belgorod National Research 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 30.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 02.06.2024.**

**The article was submitted 30.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 02.06.2024.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.512.22

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-23-28

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

**Дмитрий Вячеславович Орехов**

ведущий инженер-конструктор ООО «Борокс Гидравлика», г. Брянск, Россия

odv2902@yandex.ru

**Аннотация.** На сегодняшний день современные компании, занимающиеся производством гидравлического оборудования, стараются выстраивать тесные взаимовыгодные отношения с заказчиками вне зависимости от масштабов их бизнеса. Исходя из чего, можно с уверенностью утверждать, что количество входящих заявок возрастает и необходимо быстро и профессионально реагировать на запросы. Одним из возможных инструментов быстрого реагирования может служить автоматизация этапов заявка-производство. Целью статьи является оценка автоматизации проектирования проверки принципиальных гидравлических схем в рамках предприятий, которые занимаются производством и ремонтом объемного гидропривода, а также улучшение существующих методик. Для достижения поставленной цели необходимо оценить существующие методики, используемые на предприятиях, а также проанализировать время, которое тратится на проверки с использованием автоматизации и без нее.

**Ключевые слова:** САПР, гидравлическая станция, объемный гидропривод, принципиальная гидравлическая схема, автоматизация проектирования

**Для цитирования:** Орехов Д.В. Опыт применения системы автоматизированного проектирования специализированных гидравлических станций на промышленном предприятии // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 23-28. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-23-28.

Original article

Open Access Article

## EXPERIENCE OF USING THE AUTOMATED DESIGN SYSTEM FOR SPECIALIZED HYDRAULIC STATIONS AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

**Dmitry V. Orekhov**

leading design engineer, Borox Hydraulics LLC, Bryansk, Russia

odv2902@yandex.ru

**Abstract.** Today, modern companies engaged in the hydraulic equipment production try to build close mutually beneficial relationships with customers, regardless of their business scale. Based on this, it can be confidently stated that the number of incoming requests is increasing and it is necessary to respond to requests quickly and professionally. One of the possible tools for rapid response can be automating the application-production stages. The aim of the article is to assess the automation of designing the verification of basic hydraulic circuits within the framework of enterprises that are engaged in producing and repairing volumetric hydraulic drives, as well as to improve the existing methods. To achieve this aim, it is necessary to evaluate the existing methods used at enterprises, as well as analyze the time spent on checks with using the automation and without applying it.

**Keywords:** CAD, hydraulic station, volumetric hydraulic drive, basic hydraulic diagram, design automation

**For citation:** Orekhov D.V. Experience of Using the Automated Design System for Specialized Hydraulic Stations at an Industrial Enterprise. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 23-28. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-23-28.

### Введение

В настоящее время в России продолжается модернизация предприятий и переукрупнение имеющегося на них оборудования в связи с новыми обстоятельствами на мировом и внутреннем рынке, включая санкционные ограничения. Анализируя спрос, можно с уверенностью сказать, что большая часть предприятий в сфере машиностроения, нефтегазовой промышленности, сталелитейного производства, горношахтного оборудования и других в РФ нуждаются в замене, либо модернизации имеющегося на них гидравлического оборудования в короткие сроки и на условиях импортозамещения.

К главным критериям проектирования гидравлического оборудования можно отнести

высокое качество продукции, низкую стоимость, сжатые сроки поставки и возможности по расширению функционала изделия [1].

Одной из категорий гидравлического оборудования являются гидравлические станции. Гидравлическая станция представляет собой сложную техническую систему, которая преобразует различные виды энергии в механическую энергию потока масла. Самая простейшая гидравлическая станция включает в себя порядка 10 различных компонентов, а проектирование ее начинается с разработки принципиальной гидравлической схемы.

Разработка принципиальных гидравлических схем достаточно сложная инженерная задача, требующая высокой квалификации проектировщика, которая на следующем этапе требует проверки правильности построения. Данный вид проверки можно назвать теоретической проверкой работоспособности принципиальной гидравлической схемы. Теоретическая проверка необходима для корректного проектирования и расчета основных параметров, но в исключительных случаях при проектировании сложных гидравлических станций, которые можно назвать специализированными, данная проверка отличается от реальных испытаний.

### Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо решить несколько задач, а именно: проанализировать имеющиеся подходы проверки теоретической работоспособности принципиальных гидравлических схем, а также предложить их улучшения и сравнить их эффективность. Классический подход проверки теоретической работоспособности принципиальной гидравлической схемы базируется на знаниях и опыте проектировщика, что увеличивает время, затраченное на проверку. Существенное сокращение временных затрат на проверку можно добиться систематизировав опыт конкретного проектировщика в методики и алгоритмы, которые можно реализовать программно.

Методику теоретической проверки работоспособности принципиальной гидравлической схемы можно представить в виде имитационной модели, что позволяет тестировать уже существующую гидравлическую станцию и проводить с ней эксперименты для определения оптимальности всей конструкции. Данный подход позволит изучить устройство со всех сторон и проверить, как оно себя ведет при изменении входных параметров.

### Описание автоматизации методики проверки теоретической работоспособности

Принципиальная гидравлическая схема проектируемой гидравлической станции не содержит информации о математическом представлении ее составных элементов. Учитывая важность графического представления проектируемой системы и необходимость оперирования не только с элементным составом, но и с физическим представлением элементов, введем еще одно понятие – представление гидравлической схемы в виде математической модели.

Большинство физических схем можно представить в виде цепи, состоящей из объединенных между собой через внешние узлы типовых компонент. На рис. 1 представлена простейшая гидравлическая схема объемного гидропривода. Для формирования матрицы отношений между элементами, целесообразно структуру разработанной принципиальной гидравлической схемы описать посредством идентификации элементов и нумерации узлов.

Для проверки работоспособности гидравлической схемы, представленной на рис. 1 необходимо преобразовать ее в математическую модель. Для простоты преобразования представим схему в виде графа, вершинами которого будут являться элементы схемы, а дугами отношения между этими элементами (рис. 2).

Преобразованная гидравлическая схема представляет собой множество элементов:

$$A = \{a_1, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

где  $n$  – число элементов, используемых в гидравлической схеме.

Так как множество элементов является конечным, то любое бинарное отношение на  $A$  можно задать списком упорядоченных пар, содержащихся в этом бинарном отношении. Пусть  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  и  $\rho$  – бинарное отношение на  $A$ . Тогда матрицей отношений  $\rho$  называется квадратная матрица размера  $n \times n$ , состоящая из нулей и единиц, такая, что в пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца стоит 1 тогда и только тогда, когда:

$$a_i \rho a_j \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – бинарное отношение на  $A$ .



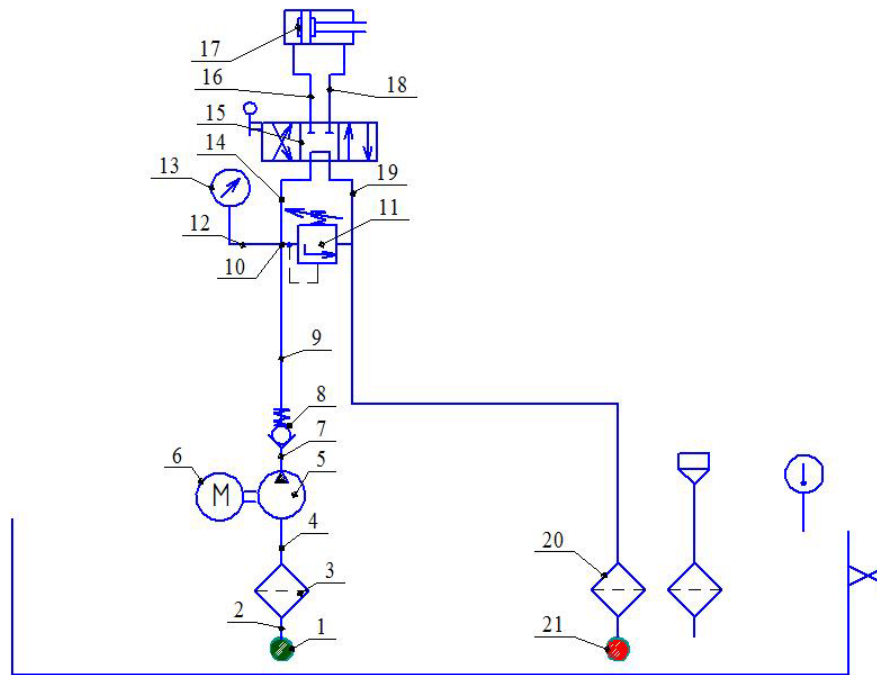


Рис. 1. Гидравлическая схема  
Fig. 1. Hydraulic circuit

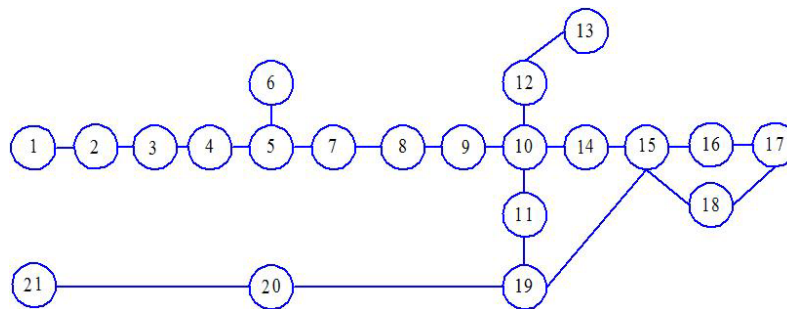


Рис. 2. Гидравлическая схема, представленная графом  
Fig. 2. Hydraulic circuit represented by a graph

На множестве элементов  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ , матрица отношений  $\rho$  имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

По матрице отношений можно однозначно определить взаимосвязь элементов друг с другом, расположение элемента в гидравлической схеме и точку перехода между напорной и сливной линией. Задав необходимые свойства каждого элемента и зная его расположение в гидравлической схеме, можно проводить проверку на работоспособность гидравлической схемы.

### Автоматизация расчета основных параметров объемного гидропривода

Для корректного функционирования автоматизированной проверки теоретической работоспособности принципиальных гидравлических схем, необходимо произвести расчет основных подсистем объемного гидропривода: энергообеспечивающей, направляющей и исполнительной. При расчете подсистем энергообеспечивающей и направляющей будем руководствоваться методиками, описанными в источниках [2 – 4], а для исполнительной подсистемы воспользуемся упрощенной методикой расчета описанной В.А. Муратовым [5].

Используя данные автоматизированные методики расчета, пользователю достаточно внести несколько значений для системы: подача насоса, частота вращения двигателя, давление в системе, диаметр поршня, диаметр штока и ход исполнительного механизма. Остальные параметры будут рассчитываться в автоматизированном режиме. Пример расчета основных параметров объемного гидропривода приведен в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

**Основные параметры энергообеспечивающей и направляющей подсистем**

Table 1

*Basic parameters of the energy supply and guidance subsystems*

Подача насоса	$Q$	4,5	л/мин	0,00007500	м <sup>3</sup> /с
Частота вращения двигателя	$n$	1500	об/мин	Мощность развиваемая насосом	
Мощность двигателя	$N$	3,15	кВт	2,12	кВт
Рабочий объем насоса	$q$	0,00000323	м <sup>3</sup> /об	3,2258	см <sup>3</sup> /об
Давление в системе	$P$	24	Мпа	240	бар(атм)
Диаметр поршня	$D1$	180	мм		
Площадь поршня	$A1$	25446,90	мм <sup>2</sup>	0,02545	м <sup>2</sup>
Диаметр штока	$d2$	90	мм	90	
Площадь штокового кольца	$A2$	19085,18	мм <sup>2</sup>	0,01909	м <sup>2</sup>
Скорость выдвижения	$v1$	0,00295	м/с	2,947	мм/с
Скорость обратного хода	$v2$	0,00393	м/с	3,930	мм/с
Усилие давления	$F1$	61,07	т	598917,35	Н
Тяговое усилие	$F2$	45,80	т	449188,02	Н
Объем бака	$v_{б}$	0,01425	м <sup>3</sup>	14,25	л
Диаметр условного прохода	$dy$	4,36	мм		
Количество тепла получаем в сек.	$Q_t$	5,93	Дж/с		
Температура жидкости	$t_{ж}$	53,01	град.	Станция	

Таблица 2

**Основные параметры исполнительной подсистемы**

Table 2

*Basic parameters of the executive subsystem*

гидроцилиндры	1	2	3	4	5	6	7
$D1$ ,мм	180	60	120	140	130	40	80
м <sup>2</sup>	0,0254	0,0028	0,0113	0,0154	0,0133	0,0013	0,0050
$d2$ ,мм	90,00	40,00	70,00	80,00	70,00	28,00	50,00
м <sup>2</sup>	0,0191	0,0016	0,0075	0,0104	0,0094	0,0006	0,0031
$l$ ,мм	1500	150	800	600	350	100	150
Скорость выдвижения, мм/с	2,95	26,53	6,63	4,87	5,65	59,68	14,92
Время выдвижения, с	508,94	5,65	120,64	123,15	61,94	1,68	10,05
Скорость задвижения, мм/с	3,93	47,75	10,05	7,23	7,96	117,03	24,49
Время задвижения, с	381,70	3,14	79,59	82,94	43,98	0,85	6,13
Скорость выдвижения всех цилиндров	0,001006 м/с				1,01 мм/с		
Скорость задвижения всех цилиндров	0,001453 м/с				1,45 мм/с		
Время выдвижения всех цилиндров	1490,69 с				24,8 мин		
	1032,26 с				17,2 мин		
Объем цилиндров:	62,40 л						

Руководствуясь данными параметрами расчета, происходит подбор рациональных компонентов, которые будут применять при разработке специализированных гидравлических станций.

### Пример работы модуля проверки теоретической работоспособности

Необходимо произвести модернизацию гидравлического станка для производства бетонных изделий: тротуарная плитка и бордюры. Данная задача возникла в связи с несоответствием паспортных данных на оборудования с реальными условиями его работы. На первом этапе необходимо внести в программный модуль, принципиальную гидравлическую схему оборудования, данная процедура производится вручную (рис. 3).

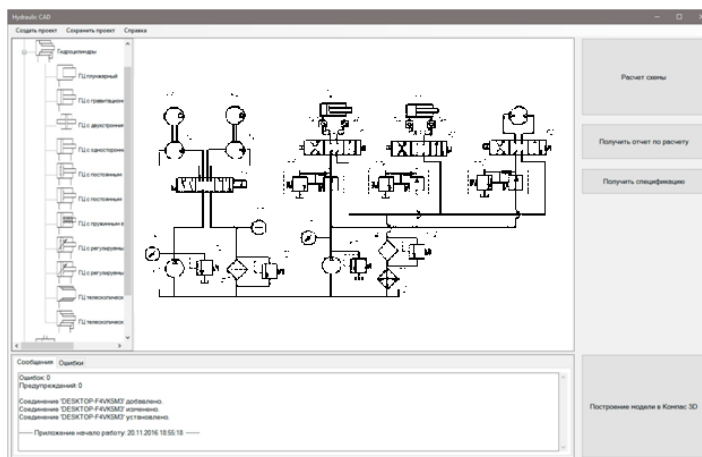


Рис. 3. Гидравлическая схема станка  
*Fig. 3. Hydraulic diagram of the machine*

Результаты работы модуля предоставляются пользователю в виде отчета основных параметров объемного гидропривода, а также номенклатуры гидравлических компонентов, рационально подобранных под данные расчета. Обработывая полученную информацию и сравнивая ее с используемыми компонентами станка, было выявлено несколько отклонений от расчета, которые могли влиять на работу оборудования.

Для устранения данных проблем необходимо было переделать исполнительный механизм станка – гидроцилиндр, а также увеличить условный проход на монтажной плите. Если переделка гидроцилиндра не заняла много времени, то при изменении условного прохода возникла проблема, что данное устройство не рассчитано для данной модернизации, в результате чего изделие было испорчено. Для дальнейшей работы станка необходимо было спроектировать и изготовить новый гидроблок (рис. 4).

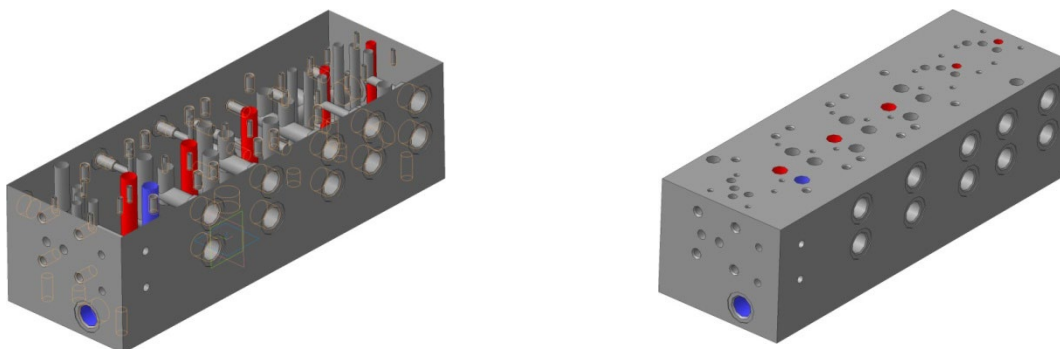


Рис. 4. Монтажная плита станка  
*Fig. 4. Mounting plate of the machine*

Изготовленная монтажная плита имеет размеры 180x160x610 мм и вес 98 кг, при ее изготовлении учитывались компоненты, которые были подобраны модулем автоматической проверки работоспособности, которые, в свою очередь, являются взаимозаменяемыми в отличие от тех, которые были раньше.

### Результаты модернизации станка

В течение месяца происходило тестирование оборудования на производстве, в результате которого можно сделать следующие выводы:

- 1) изменив исполнительный механизм станка, уменьшился цикл изготовления на 2 минуты, что повлияло на увеличение производительности на 25 % в смену;
- 2) изготовив новую монтажную плиту с подходящим диаметров условного прохода, удалось получить плавность хода исполнительного механизма, что, в свою очередь, позволило сократить брак на 25 %, на сегодняшний день он составляет 5 % в смену;
- 3) за счет правильной работы подающего механизма, сухая смесь равномерно поступала в пресс формы, что позволило получить более хорошую поверхность изделия.

### Заключение

Проведенный анализ по применения автоматизированной системы теоретической проверки работоспособности принципиальных гидравлических схем показал, что модернизация имеющегося оборудования является актуальной задачей. Применяя автоматизацию на предприятиях, которые занимаются производством и модернизацией оборудования можно существенно сократить сроки и повысить качество результатов.

#### Список источников:

1. Гойдо М.Е. Проектирование объемных гидроприводов. – М.: Машиностроение, 2009. – 304 с. Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента».
2. Азирова А.Г., Рагимов А.М., Азирова М.Г. Проектирование гидро- и пневмосистем. Учебное пособие. – Баку: АГНА, 2004. – 100 с.
3. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Э. Беренгард, М.М. Гайцгори и др.; под общ. ред С.А. Ермакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
4. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин. – Справочник. М.: Машиностроение, 1983. – 301с.
5. Марутов В.А., Павловский С.А. Гидроцилиндры. – М.: Машиностроение, 1966. – 169 с.

#### References:

1. Goydo M.E. Design of Volumetric Hydraulic Drives. Moscow: Mashinostroenie; 2009.
2. Azirov A.G., Ragimov A.M., Azirov M.G. Design of Hydraulic and Pneumatic Systems. Baku: AGN A; 2004.
3. Bazhin II, Berengard YuE, Gaitsgori MM, et al. Automated Design of Mechanical Engineering Hydraulic Drive. Ermakov SA, editor. Moscow: Mashinostroenie; 1988.
4. Vasilchenko V.A. Hydraulic Equipment of Mobile Machines. Moscow: Mashinostroenie; 1983.
5. Marutov V.A., Pavlovsky S.A. Hydraulic Cylinders. Moscow: Mashinostroenie; 1966.

#### Информация об авторах:

**Орехов Дмитрий Вячеславович**  
ведущий инженер-конструктор ООО «Борокс Гидравлика»

#### Information about the authors:

**Orekhov Dmitry Vyacheslavovich**  
Leading design engineer, Borox Hydraulics LLC

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 26.06.2024; принята к публикации 05.07.2024.

The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 26.06.2024; accepted for publication 05.07.2024.

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

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



Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.91.01

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-29-34

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИПУСКА, УДАЛЯЕМОГО ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ, ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Денис Владимирович Юдин<sup>1✉</sup>, Александр Николаевич Феофанов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Россия

<sup>1</sup> udindv@mail.ru

<sup>2</sup> feofanov.fan1@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрена проблема отсутствия систем для автоматизации подготовки производства при разработке технологического процесса изготовления деталей методом резания. Решение данной задачи обеспечит повышение конкурентоспособности предприятий и позволит снизить ошибки, возникающие из-за человеческого фактора. Задачами статьи являются разработка подхода к автоматизации проектирования технологических процессов за счет определения технологического процесса как функции по удалению припуска. Анализ припуска и определение принципа его декомпозиции на элементарные составляющие для классификации. Выявление параметров припуска для его формализации и определения взаимосвязи параметров припуска с методами обработки. Проведен анализ существующих методов обработки и их взаимосвязи с удаляемым припуском, его геометрической формы и параметров. Предложен подход для формализации припуска, реализация которой позволит автоматизировать технологическую подготовку производства в части разработки технологических процессов для механической обработки. Предложен подход для формализации припуска, в основе которого лежит его классификация и применение в качестве ее базового элемента «припуска, удаляемого режущим инструментом за один рабочий ход». Описаны дополнительные свойства и характеристики припуска для его математического описания и сохранения взаимосвязи с методами обработки. Формализация припуска, его классификация и задание функции по его удалению позволит автоматизировать разработку технологических процессов, повысить качество изготавливаемой продукции за счет снижения влияния человеческого фактора и применения оптимальных методов обработки деталей.

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства, обработка резанием, автоматизация разработки технологических процессов

**Для цитирования:** Юдин Д.В., Феофанов А.Н. Формализация припуска, удаляемого при обработке резанием, для решения задачи автоматизации разработки технологического процесса // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 29-34. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-29-34.

Original article

Open Access Article

## FORMALIZING THE ALLOWANCE REMOVED DURING CUTTING TO SOLVE THE PROBLEM OF AUTOMATING THE TECHNOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT

Denis V. Yudin<sup>1✉</sup>, Alexander N. Feofanov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

<sup>1</sup> udindv@mail.ru

<sup>2</sup> feofanov.fan1@yandex.ru

**Abstract.** The paper considers the problem of lacking systems for automating the production preparation while developing the technological process of manufacturing parts by cutting. The solution to this problem will increase enterprises' competitiveness and reduce errors arising from the human factor. The objectives of the article are to develop an approach to automating the technological process design by defining the technological process as a function of removing the allowance. The work analyses the allowance and determines the principle of its decomposition into elementary components for classification, identifies the allowance parameters for its formalization and determines the relationship of the allowance parameters with processing methods. The authors carry out the analysis of the existing processing methods and their relationship with the removable allowance, its geometric shape and parameters, propose an approach for the allowance formalization, the implementation of which will automate the technological preparation of production in terms of developing technological processes for mechanical processing. The work suggests an approach

for formalizing the allowance, based on its classification and application as its basic element of “allowance removed by the cutting tool in one working stroke”, describes additional properties and characteristics of the allowance for its mathematical description and preservation of the relationship with the processing methods. Formalization of the allowance, its classification and assignment of the function for its removal will allow automating the technological process development, improving the quality of manufactured products by reducing the influence of the human factor and using optimal methods for processing parts.

**Keywords:** technological preparation of production, cutting processing, automating the technological process development

**For citation:** Yudin D.V., Feofanov A.N. Formalizing the Allowance Removed During Cutting to Solve the Problem of Automating the Technological Process Development. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 29-34. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-29-34.

## Введение

Технологический процесс (ТП) изготовления деталей в машиностроении может включать следующие виды обработки: обработка давлением; обработка резанием; термическая обработка; электрофизическая обработка; электрохимическая обработка.

Среди данных видов обработки, в условиях мелкосерийного производства ТП обработки резанием обладают наибольшим разнообразием, трудоемкостью и стоимостью [1]. Это связано с большим разнообразием обрабатываемых деталей, сложностью унификации ТП, дорогостоящими оборудованием и режущим инструментом (РИ). Стоит отметить, что в реальных производственных условиях, разработка ТП ведется на основе накопленного опыта и традиций конкретного предприятия или с использованием справочных таблиц экономической эффективности, представленных в специализированной литературе [2]. Этот процесс требует тщательного анализа большого объема данных, что может привести к ошибкам и различным интерпретациям. Качество работы зависит от квалификации и опыта специалиста.

Повышению производительности труда, способствует автоматизация подготовки производства и разработки ТП [3, 10]. Автоматизация может повысить скорость и качество разработки ТП, способствует применению наиболее рациональных методов обработки, уменьшению ошибок за счет исключения влияния человеческого фактора и снижению издержек при унификации ТП [4].

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) ТП позволяют оптимизировать работу и решить множество рутинных задач, которые ранее отнимали много времени у специалистов [5], но при всех существующих достоинствах САПР ТП, разработка ТП не автоматизирована.

## Постановка задачи

Операции по обработке резанием заключаются в образовании новых поверхностей посредством отделения поверхностных слоев материала с образованием стружки [6]. Таким образом ТП механической обработки резанием является функцией ( $F_{\text{мех.обр}}$ ) удаления припуска детали:

$$\text{ТП}_{\text{дет}} = F_{\text{мех.обр}}(\text{Пр}_{\text{дет}}), \quad (1)$$

где  $\text{ТП}_{\text{дет}}$  – технологический процесс механической обработки резанием;  $\text{Пр}_{\text{дет}}$  – припуск детали.

Задание функции (1), позволит решить задачу по автоматизации разработки ТП. Для этого потребуется выполнить два шага: формализация припуска, т.е. его математическое описание; определение взаимосвязи между припуском и методом обработки (МО), т.е. задание правил.

Проблема заключается в том, что припуск может иметь сложную геометрическую форму и большое разнообразие фигур, из-за роста номенклатуры выпускаемых приборов в современном производстве. В связи с чем припуск невозможно описать изначально ограниченным набором характеристик, а также учесть данные характеристики при выявлении закономерностей и взаимосвязей с МО.

Решением для формализации припуска является уменьшение его разнообразия и

сложности геометрической формы (ГФ), что связано с его декомпозицией на «элементарные припуска» (ЭП), позволяющие преобразовать функцию (1) в функцию:

$$TP_{дет} = F_{мех.обр}(\text{ЭП. } 1_{дет}) + F_{мех.обр}(\text{ЭП. } 2_{дет}) + F_{мех.обр}(\text{ЭП. } 3_{дет}) + \dots + F_{мех.обр}(\text{ЭП. } N_{дет}), \quad (2)$$

где ЭП. $N_{дет}$  – ЭП  $N$  припуска детали.

Условиями преобразования функции (1) в функцию (2) является: ЭП позволяют выявить взаимосвязь с МО; функция  $F_{мех.обр}$  от ЭП имеет решение, которое входит в область значения функции (1).

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Удаление припуска детали происходит последовательно, при выполнении рабочих ходов (РХ), таким образом весь припуск можно разделить на припуска, удаляемые за один РХ ( $\delta$ ):

$$Pr_{деталь} = \sum_i^n Pr_{дет.оп.i} = \sum_i^n \sum_r^m Pr_{дет.,оп.i \text{ переход } r} = \sum_i^n \sum_r^m \sum_k^l \delta_k, \quad (3)$$

где  $i$  – номер операции;  $r$  – номер рабочего хода операции  $i$ ;  $k$  – номер рабочего хода перехода  $r$ ;  $\delta$  – припуск, удаляемый за один рабочий ход.

Один РХ РИ представляет собой результирующее движение резания (РДР) в процессе механической обработки [7] и зависит от кинематической схемы станка и вида РИ. Таким образом, существует взаимосвязь между  $\delta$  и МО. Следовательно, для  $\delta$  условия преобразования функции (1) в функцию (2) выполнены:

$$\forall(\delta_k) \exists F_{мех.обр}(\delta_k) \in F_{мех.обр}(Pr_{дет}), \quad (4)$$

$\delta$  поддается математическому описанию с помощью ограниченного набора характеристик, т.к. его размеры зависят от параметров РИ (форма, размеры) и глубины резания, а ГФ припуска зависит от РДР. Следовательно,  $\delta$  можно использовать как базовый элемент при классификации ЭП. Для того чтобы сохранить условия преобразования (4) для классифицируемых элементов и не ограничивать их размеры, необходимо наложить на ЭП следующие ограничения: для обработки ЭП достаточно одного инструмента; траектории РХ при обработке ЭП расположены на одинаковом расстоянии друг от друга.

Для определения формы ЭП проведен анализ существующих МО резанием, который показал, что ЭП можно сгруппировать в 2 группы по ГФ: цилиндрическую и призматическую (табл. 1).

Таблица 1

Анализ ГФ припуска в зависимости от метода обработки\*

Table 1

*Analysis of the GF allowance depending on the processing method\**

Метод обработки* / Параметр	Фрезерование	Плоское шлифование	Токарная обработка	Сверление, зенкерование, развертывание, хонингование	Шлифование (Круглое, бесцентровое, внутреннее)
Что осуществляет главное движение резания	РИ	РИ	Заготовка	РИ	РИ
Главное движение резания	Вращ-ное	Вращ-ное	Вращ-ное	Вращ-ное	Вращ-ное
Главное движение подачи	Прямол-ное	Прямол-ное	Прямол-ное	Прямол-ное	Вращ-ное + Прямол-ное
Форма припуска	призматическая	призматическая	цилиндрическая	цилиндрическая	цилиндрическая

\*В таблице не учтены методы обработки для таких видов поверхностей как резьба и зубья, так как для обработки данных элементов применяют специальные инструменты и/или оборудование и существуют стандартизованные технологии их обработки

Геометрическое представление базовых вариантов ЭП представлены на рис. 1, 2:

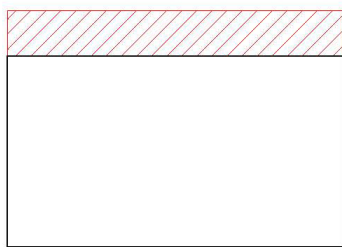


Рис. 1. Геометрическая форма призматического припуска  
*Fig. 1. Geometric shape of prismatic allowance*

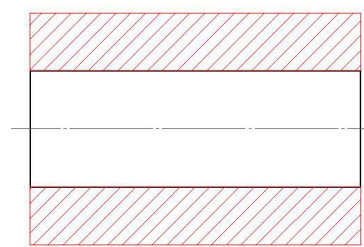
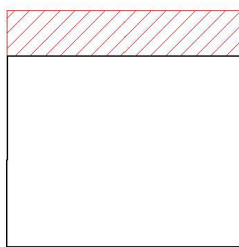


Рис. 2. Геометрическая форма цилиндрического припуска  
*Fig. 2. Geometric shape of cylindrical allowance*

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод, что для обработки припусков одинаковой формы могут быть применены различные МО. В связи с чем, необходимо задать дополнительные параметры [8], от которых будет зависеть конечный выбор МО. Такими параметрами являются [9]: точность обработки; твердость поверхности; шероховатость поверхности; обрабатываемый материал.

Также необходимо учесть дополнительные параметры, которые влияют на особенности при выборе РИ (вылет инструмента, форма шлифовального круга и т.п.) или на дополнительные технологические возможности металлорежущего оборудования (количество управляемых осей, наличие ЧПУ и т.п.):

– ограничения на подход инструмента, т.е. количество плоскостей припуска, граничащих с поверхностью детали. Частные случаи приведены на рис.3, 4:

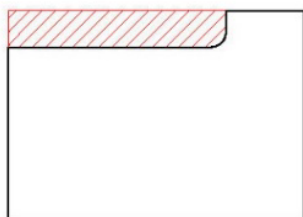


Рис. 3. Ограничение призматического припуска  
*Fig. 3. Limitation of prismatic allowance*

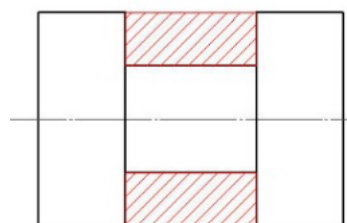


Рис. 4. Ограничение цилиндрического припуска  
*Fig. 4. Limitation of cylindrical allowance*

– искривление плоскостей припуска, граничащих с плоскостью детали (рис. 5, 6):

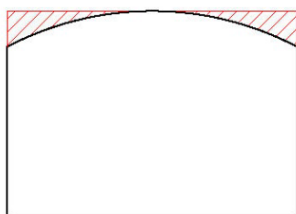


Рис. 5. Искривление плоскости призматического припуска  
*Fig. 5. Curvature of the prismatic allowance plane*

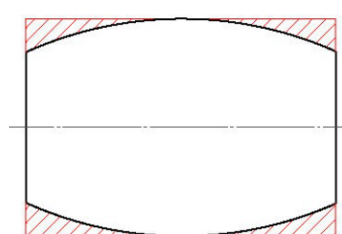
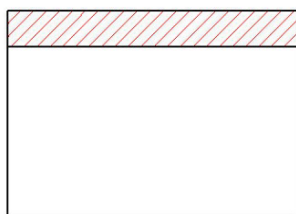


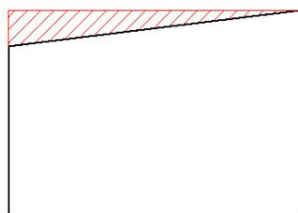
Рис. 6. Искривление плоскости цилиндрического припуска  
*Fig. 6. Curvature of the cylindrical allowance plane*

– эксцентриситет оси симметрии припуска (для цилиндрической формы припуска), относительно оси вращения или плоскости симметрии обрабатываемой детали (рис. 7):



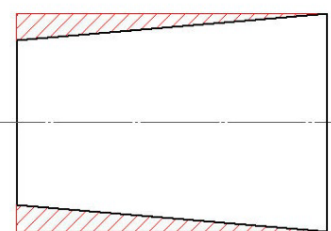
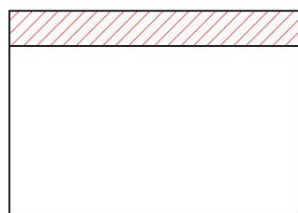
**Рис. 7. Эксцентриситет оси вращения цилиндрического припуска**  
**Fig. 7. Eccentricity of the rotation axis of the cylindrical allowance**

– не параллельность плоскости припуска относительно оси вращения детали (для цилиндрической формы припуска) или базовой плоскости (рис. 8, 9):



**Рис. 8. Не параллельность плоскости призматического припуска**

**Fig. 8. Non-parallelism of the prismatic allowance plane**



**Рис. 9. Не параллельность плоскости цилиндрического припуска**

**Fig. 9. Non-parallelism of the cylindrical allowance plane**

В данной работе представлены не все частные варианты ЭП, зависящие от дополнительных параметров, но необходимо отметить, что перечисленные параметры, легко математически описываются, т.е. формализуемы, что обеспечит решение задачи по заданию функции 2.

### Заключение

Решение задачи по формализации припуска и его классификации предоставит возможность автоматизации разработки ТП. На основе классификации припусков возможна унификация ТП, РИ, оборудования и технологического оснащения, применяемого при производстве.

В данной работе для решения задачи автоматизации разработки ТП обработки резанием, предлагается использовать метод, в основе которого лежит взаимосвязь между припуском и МО. Введена функция и определены шаги для задания функции разработки ТП. Для припуска, который является аргументом, сформулированы требования по формализации. Так как припуск является сложной фигурой, которую сложно описать математически, предлагается его декомпозиция на элементарные припуска и их классификация. В качестве базового элемента, на основе которого строится классификация предлагается использовать припуск, удаляемый за один рабочий ход инструмента. Для обеспечения взаимосвязи ЭП с МО сформулированы его требуемые свойства и геометрические характеристики.

### Список источников:

1. Куликов Д.Д., Яблочников Е.И., Бабанин В.С. Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства / Часть 7. Системы проектирования технологических процессов / Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 136 с.
2. Матвеев В.В., Тверской М.М., Бойков Ф.И. Размерный анализ технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
3. Основы автоматизации машиностроительного производства / Е.Р. Ковальчук и др. / М.: Высш. шк., 1999. – 312 с.
4. Митин С.Г., Бочкарев П.Ю. Принципы создания системы автоматизированного

### References:

1. Kulikov D.D., Yablochnikov E.I., Babanin V.S. Systems for Designing Technological Processes. Part 7. In: Intelligent Software Packages for Technical and Technological Preparation of Production. Saint Petersburg: ITMO University; 2011.
2. Matveev V.V., Tverskoy M.M., Boykov F.I. Dimensional Analysis of Technological Processes. Moscow: Mashinostroenie; 1982.
3. Kovalchuk ER, et al. Fundamentals of Automation of Machine Building Production. Moscow: Higher School; 1999.
4. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Principles of Creating the System for Automated Design of Production



проектирования технологических операций в условиях многономенклатурного производства // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 2 (32-2). – С. 117-122.

5. Щербаков Н.П. Автоматизация технологического проектирования: учебное пособие – Барнаул: Издательство Алтайского государственного технологического университета им. И.И. Ползунова. – 2002. – 434 с.

6. ГОСТ Р 50995.3.1-96. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий: введен в действие постановлением Госстандарта СССР от 30 июля 1982 г. N 2988: дата введения 1983-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 15 с.

7. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.

8. Юдин Д.В., Феофанов А.Н. Основные характеристики припусков, удаляемые механической обработкой со съемом металла деталей типа «тело вращения» // СМиС-2023. Технология управления качеством. Материалы Международной научно-технической конференции «СМиС-2023. Инновационные технологии в управлении качеством». – 2023. – С. 60-67.

9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. [и др.]. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т.1. – 910 с.

10. Kalas S., Small-Scale Automation in Shipbuilding. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 201, 92 p.

11. Юрченко К.А. Зависимость эффективности деятельности предприятия от ряда характеризующих факторов // Молодой ученый. – 2012. – №2. – С. 162-165.

Operations in Multiproduct Manufacturing. Science Vector of Togliatti State University. 2015;2(32-2):117-122.

5. Shcherbakov N.P. Automation of Technological Design. Barnaul: Publishing House of Polzunov Altai State Technological University; 2002.

6. State Standard R 50995.3.1-96. Unified System for Technological Documentation. Terms and Definitions of Main Concepts. Moscow: Publishing House of Standards; 1983.

7. Ordinartsev IA, Filippov GV, Shevchenko AN, et al. Toolmaker's Handbook. Ordinartsev IA, editor, Leningrad: Mashinostroenie; Leningrad Department; 1987.

8. Yudin DV, Feofanov AN. Main Characteristics of Allowances Removed by Mechanical Treatment With Metal Removal of Parts Type of Body of Rotation. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference SMAC-2023 Innovative Technologies in Quality Management. SMAC-2023 Quality Management Technology: 2023. p. 60-67.

9. Dalsky AM, Kosilova AG, Meshcheryakov RK, Suslov AG, et al. Mechanical Engineers' Handbook, vol. 1. Moscow: Mashinostroenie-1; 2001.

10. Kalas S., Small-Scale Automation in Shipbuilding. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology; 2015.

11. Yurchenko K.A. Dependence of the Enterprise's Efficiency on a Number of Characterizing Factors. Young Scientist. 2012;2:162-165.

### **Информация об авторах:**

**Юдин Денис Владимирович**  
аспирант МГТУ «СТАНКИН»

**Феофанов Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры инженерная графика МГТУ «СТАНКИН», вице-президент академии проблем качества, отделение «Квалиметрия» МГТУ «Станкин»

### **Information about the authors:**

**Yudin Denis Vladimirovich**  
Postgraduate student of Moscow State University of Technology «STANKIN»

**Feofanov Alexander Nikolaevich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Engineering Graphics of Moscow State University of Technology «STANKIN», Vice President of the Academy of Quality Problems at the Qualimetry Department 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 17.05.2024; одобрена после рецензирования 05.07.2024; принята к публикации 10.07.2024.**

**The article was submitted 17.05.2024; approved after reviewing 05.07.2024; accepted for publication 10.07.2024.**

**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 681.516.312

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-35-40

### ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИХ КОНТУР ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО УСИЛИЮ

Иван Александрович Брич<sup>1</sup>, Сергей Александрович Шептунов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> britch.ivan@yandex.ru

<sup>2</sup> ship@ikti.ru

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы силомоментного оцувствления в полуавтоматических системах. Описаны основные принципы управления в эргатических системах с точки зрения теории автоматического управления. Рассмотрен метод повышения качества управления путем введение дополнительных обратных связей для оператора. В качестве наиболее перспективного канала обратной связи для внедрения предложено силомоментное оцувствление. Описана актуальность данного канала в реализованных системах автоматического управления, приведены примеры. Приведено описание контура обратной связи по усилиям на рабочем органе манипулятора. В качестве основных проблем при реализации рассматриваемых полуавтоматических систем выделены: влияние кинематической цепи, фильтрация и запаздывание, компенсация силы тяжести, а также проблема контура естественной обратной связи.

**Ключевые слова:** эргатические системы, системы человек-машина, полуавтоматическое управление, силомоментное оцувствление, обратная связь по усилию, интуитивность управления

**Для цитирования:** Брич И.А., Шептунов С.А. Проблемы реализации систем полуавтоматического управления, включающих контур обратной связи по усилию // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 35-40. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-35-40.

Original article

Open Access Article

### PROBLEMS OF IMPLEMENTING SEMI-AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS INCLUDING A FORCE FEEDBACK LOOP

Ivan A. Brich<sup>1</sup>, Sergey A. Sheptunov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup> britch.ivan@yandex.ru

<sup>2</sup> ship@ikti.ru

**Abstract.** The issues of force-torque sensing in semi-automatic systems are considered. The paper describes the main control principles in ergatic systems from the viewpoint of automatic control theory, considers a method for improving the control quality by introducing additional feedback for the operator. The work proposes force-torque sensing as the most promising feedback channel for the implementation, describes the relevance of this channel in the fulfilled automatic control systems, gives examples. A description of the feedback loop for the efforts on the manipulator's working element is given. The work highlights the following as the main problems in implementing the considered semi-automatic systems: the kinematic chain influence, filtering and delay, gravity compensation, as well as the problem of the natural feedback loop.

**Keywords:** ergatic systems, man-machine systems, semi-automatic control, force-torque sensing, force feedback, intuitiveness of control

**For citation:** Brich I.A., Sheptunov S.A. Problems of Implementing Semi-Automatic Control Systems Including a Force Feedback Loop. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 35-40. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-35-40.

## Введение

Автоматизация производства является одним из наиболее быстроразвивающихся направлений человеческой деятельности. Ежедневно, встречаясь с новыми вызовами, индустрия промышленных автоматизированных систем постоянно развивается с момента своего формирования.

Однако не все процессы могут быть целиком автоматизированы. Причиной для этого являются различные факторы: недостаточная безопасность полностью автоматического процесса, невозможность заранее учесть все сценарии развития тех или иных событий, недостаточная гибкость в принятии решений. Примерами таких областей могут послужить атомная энергетика и проведение хирургических операций. Ответом на этот инженерный вызов стало появление полуавтоматических систем.

## Управление в полуавтоматических системах

Полуавтоматический комплекс включает в состав своей системы управления не только технические средства, но и человека (оператора) [1]. Внедрение человека в техническую систему позволяет расширить способности к принятию нестандартных решений, реакций на нестандартные обстоятельства, расширяя спектр ее возможных применений. В то же время техническая система расширяет возможности самого человека повышая его силовые и скоростные характеристики. Эргатическая система также позволяет, при необходимости, избегать нахождения людей в опасной для жизни и здоровья области.

Основной идеей построения полуавтоматической системы является синтез человека и системы автоматического управления. Это порождает центральный вектор развития таких систем – углубление интеграции при взаимодействии эргатической системы и оператора [2]. При рассмотрении полуавтоматической системы с точки зрения теории автоматического управления можно отметить, что оператор выполняет функции генератора задающего сигнала, сумматора и регулятора внешнего контура управления (рис. 1).

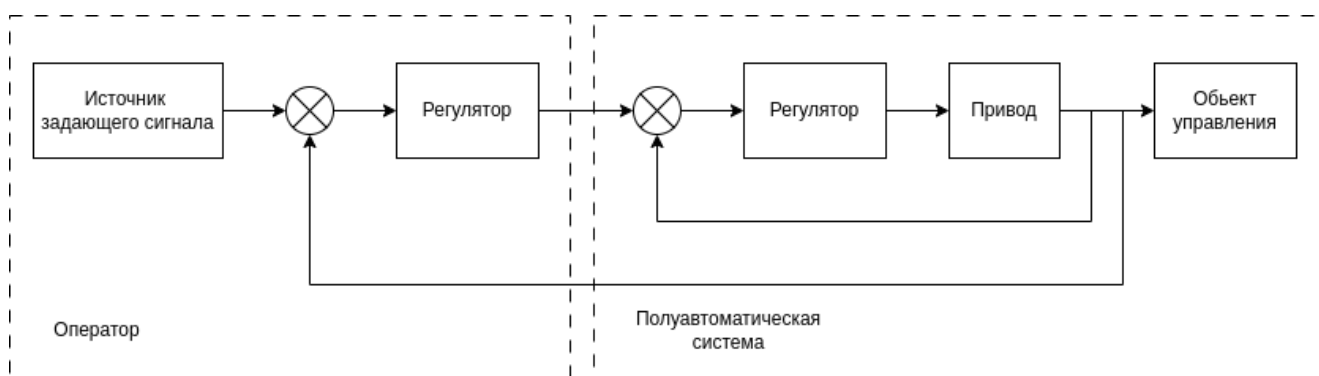


Рис. 1. Схема полуавтоматической системы управления под управлением оператора

Fig. 1. Diagram of a semi-automatic control system under operator control

На представленной выше схеме также видно, что точками пересечения человека и системы являются каналы входных и выходных данных, поэтому совершенствование взаимодействия должно концентрироваться на улучшении этих двух каналов. В данной статье рассматривается вопрос расширения информационного канала обратной связи от полуавтоматической системы к оператору.

Наиболее распространенным каналом обратной связи на данный момент является визуальный. В простейшем случае в рабочей области устанавливается камера, изображение с которой передается на пункт управления. Таким образом, оператор способен в реальном времени оценивать текущую обстановку в рабочей области и планировать движения рабочего инструмента манипулятора. Непосредственное управление манипулятором может быть осуществлено и по абсолютным значениям положений звеньев, однако такой подход является для человека контринтуитивным. Главным преимуществом визуального канала обратной связи является его естественность для человека. В повседневной жизни люди получают большую часть информации именно через глаза, поэтому данный вид обратной связи является также наиболее выгодным с точки зрения передачи полезной информации.

### **Силомоментное очувствление в полуавтоматических системах управления**

Одним из методов повышения качества управления эргатическими системами является увеличение количества получаемой оператором в процессе работы информации. Это может быть достигнуто расширением существующих каналов дополнительными слоями данных, например, использование не только обычных камер, но и тепловизионных. Однако в данной статье предлагается другой путь – введение дополнительного канала обратной связи. Важнейшим параметром, влияющим на качество управления полуавтоматической системой, является его интуитивность. Для взаимодействия с человеком наиболее естественными являются контуры обратной связи, которые заменяют или расширяют человеческие.

С биологической точки зрения человек обладает 6 органами чувств: глаза (зрение), уши (слух), язык (вкус), нос (обоняние), кожа (осязание, ощущение боли, температуры), вестибулярный аппарат (чувство равновесия и положения в пространстве, ускорение, ощущение веса).

Выше уже было рассмотрено зрение, как базовый канал для управления в эргатических системах. Звуковой канал обратной связи является значительно менее информативным и допускает неоднозначность интерпретаций, поэтому он применяется реже. Однако с технической точки зрения его реализация не вызывает существенных сложностей. Использование обоняния в промышленных системах также не является информативным. С его функциями лучше справляются различные газоанализаторы, выдающие более точное и однозначное заключение об условиях в рабочей области. Кроме того, реализация обратной связи по обонянию является неоправданно сложной технической задачей. В свою очередь использование вестибулярного аппарата нашло узкий круг применения, однако это почти не относится к промышленным системам, потому что они остаются статично закрепленными в процессе работы, изменяя положение только рабочего органа.

В свою очередь обратная связь по осязанию является очень удачным вариантом для повышения интуитивности управления. Взаимодействие с объектами в той или иной степени, как наиболее распространенная задача эргатических систем, подразумевает для человека осязательные ощущения. Информация о прикосновении к объекту, жесткости его поверхности, текстуре, а также температуре, могут значительно повысить качество управления оператором. Кроме того, они обладают высокой степенью интуитивности, так как заменяют естественные для человека ощущения.

Важно отметить, что в промышленной робототехнике силомоментное очувствление нашло определенное распространение. В промышленных манипуляторах оно используется для работы с разнородными объектами. Это позволяет схвату сжимать предметы для переноски без деформации. Информация о силах и моментах, действующих на схват в процессе работы, также позволяет снизить требования к точности позиционирования объектов в рабочем пространстве робота [3, 4].

Силомоментное очувствление также получило распространение и в мобильной робототехнике, однако там оно обычно используется для управления манипуляторами, установленными на подвижных платформах [5, 6].

Следует также упомянуть о применении силомоментного оцувствления в полуавтоматической системе в ходе проведения совместного космического эксперимента Роскосмоса, Германского аэрокосмического центра (DLR), ЦНИИ РТК и РКК «Энергия» под названием «Контур-2». В нем изучались возможности телеуправления напланетными роботами с борта орбитального космического аппарата по комбинированному каналу связи с ограниченной пропускной способностью для решения задач исследования планет Солнечной системы. Однако в данном случае воздействие на рукоятку управления использовалось не для передачи информации о силах, действующих на робота, а о текущей ошибке позиционирования и величине задержки сигнала. Таким образом, решалась задача управления в случае сложных условий передачи сигналов управления, но не повышения качества управления, путем передачи информации о силах, действующих на рабочий орган системы [7].

Однако, в отличие от полностью автоматических промышленных систем, в полуавтоматических системах реализация данного контура управления является более комплексной и сложной задачей, требующей дополнительных исследований и проектных обоснований. Далее будут рассмотрены проблемы, связанные с реализацией контура обратной связи по тактильным ощущениям между эргатической системой и оператором.

### **Проблемы реализации систем силомоментного оцувствления**

В общем виде система силомоментного оцувствления требует реализации нескольких устройств: датчик моментов и сил, действующих на рабочий инструмент манипулятора, математический вычислитель, осуществляющий предварительную обработку сигнала датчика, переход в систему координат оператора и т.д., а также исполнительные приводы, которые будут создавать рассчитанные моменты на устройстве управления, например, ручке.

В качестве первой проблемы было выделено влияние кинематической цепи, связанной с датчиком, на достоверность данных. В идеальном случае любые тела, находящиеся между сенсором и исследуемой поверхностью тела, должны либо быть абсолютно твердыми и жесткими, либо должны отсутствовать. Однако при реализации такая конструкция является сложно достижимой. Это провоцирует то, что изгибы, эффекты сухого и вязкого трения приводят к отработке некорректной тактильной сигнатуры поверхности. Кроме того, это накладывает ограничения на возможный выбор методики измерения моментов и сил. Любой косвенный метод измерения также повлечет за собой неточность в реализации системы.

Второй проблемой можно назвать связь фильтрации и запаздывания. Главной задачей внедрения силомоментного оцувствления в эргатическую систему является повышение качества управления его интуитивности. Однако человеческий мозг очень требователен к величине задержек, при которых сохраняется натуральность процессов. Если при управлении будет отсутствовать синхронизация между тем, что человек будет видеть через камеры, и тем, что он будет чувствовать с управляющего устройства, это может приводить не только к потере интуитивности управления, но и к общему ухудшению качества управления, делая влияние силомоментного оцувствления не нейтральным, а даже отрицательным.

В тоже время сигнал с датчиков усилия зачастую обладает высокой степенью зашумленности и требуется фильтрации. Фильтрация, в свою очередь, вносит задержки в систему управления, которые могут быть критичны по описанным выше причинам. Таким образом при выборе алгоритмов фильтрации следует опираться не только на математические модели, но и на проведение натуральных исследований о влиянии текущих задержки фильтра на восприятие человеком ощущений от управления.

Следующей важнейшей проблемой является реализация компенсации силы тяжести. Данная проблема может появиться и на стороне датчика, и на стороне управляющего устройства и зависит от конструктивных особенностей этих блоков. Для реализации интуитивной обратной связи требуется определение трехмерных векторов сил и моментов в пространстве. Если в определенный момент времени хват манипулятора не будет касаться какой-либо поверхности, единственной действующей на него силой окажется сила тяжести.



Однако нет никакой необходимости передавать эту силу на управляющий орган оператора, поэтому она должна быть скомпенсирована рассчитанным значением.

В случае стационарных систем компенсация гравитации представляет задачу решения обратной задачи кинематики и последующего преобразования вектора силы тяжести из системы координат схвата в систему координат сенсора. Однако, как уже отмечалось выше, эргатические системы приобретают все большую популярность в задачах космической отрасли [8, 9].

В этом случае величина силы тяжести также становится переменной величиной. Ее значение должно будет рассчитываться в зависимости от высоты, ближайшего космического тела и т.д. [10]. Кроме того, расчет направления ее действия становится более комплексной задачей, потому что космический аппарат может менять свое положение относительно планеты в процессе работы робототехнической системы.

В качестве четвертой проблемы было выделено появление естественной обратной связи в системе. При появлении препятствия на пути движения схвата манипулятора датчик усилия фиксирует появление противодействующей силы. Это сигнал передается на ручку управления оператора. Поскольку человек не обладает мгновенной реакцией он не успевает отреагировать на появившееся противодействие на ручке управления, что приводит к ее отклонению в обратном направлении, что, в свою очередь, приводит к движению манипулятора в направлении, противоположенном встреченному препятствию. Таким образом формируется проблема невозможности идентифицировать и разделять сигнал обратной связи по усилию и непосредственный управляющий сигнал управления.

### Заключение

Реализация контура обратной связи по силомоментному оцувствлению в полуавтоматических системах является одной из актуальных и комплексных задач современной робототехники. В данной статье приведено описание управления в обобщенной системе, в состав которой входит человек (оператор). В качестве главного средства повышения интуитивности управления предложено силомоментное оцувствление. Раскрыт вопрос о проблемах, возникающих при попытке реализации данного контура в эргатических системах, в которые входят: влияние кинематической цепи, фильтрация и запаздывание, компенсация силы тяжести, а также проблема контура естественной обратной связи.

#### Список источников:

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 304 с.
2. Управление робототехническими системами с силомоментным оцувствлением: учебное пособие / И.Н. Егоров и др. – 2005.
3. Горянина К.И., Катин О.И., Донской Д.Ю. Сенсорные системы оцувствления адаптивного управления роботом-манипулятором общего назначения // Научное обозрение педагогические науки. – 2019.
4. Любарский А.В. Реализация робототехнических систем с силомоментным оцувствлением // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2019. – С. 1488-1492.
5. Солдатов А.В., Воротников С.А. Система силомоментного оцувствления мобильного манипуляционного робота специального назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №. 6 (6). – С. 26.

#### References:

1. Popov E.P. Theory of Linear Systems of Automatic Regulation and Control. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1989.
2. Egorov IN, et al. Control of Robotic Systems With Force-Torque Sensing; 2005.
3. Goryanina K.I., Katin O.I., Donskoy D.Yu. Sensory Systems Tactile Sensing Adaptive Control of a Robot Manipulator General Purpose. Science Review. Pedagogical Sciences; 2019.
4. Lyubarsky AV. Implementation of Robotic Systems With Force-Torque Sensing. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of Belgorod Shukhov State Technological University. 2019;1488-1492.
5. Soldatov A.V., Vorotnikov S.A. System of Force-Moment Sensitization of Special-Purpose Mobile Manipulation Robot. Engineering Journal: Science and Innovation. 2012;6(6):26.

6. Технологии модернизации и оучувствления мобильных роботов специального назначения / Прянничков В.Е. и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 116. – №. 3. – С. 166-171.

7. Результаты космического эксперимента "Контур-2" по отработке технологий удаленного управления напланетными робототехническими объектами / Мулюха В.А. и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 153-169.

8. Сергеев А.В., Сергеев С.Ф. Индуцированная среда иммерсивного интерфейса мобильного космического робота с силомоментным оучувствлением // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018). – 2018. – С. 211-217.

9. Сергеев А.В., Гук М.Ю. Управление мобильным роботом космического назначения с применением виртуальной реальности и силомоментного оучувствления // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – №. 4. – С. 44.

10. Ващенко А.В. Влияние возмущающих гравитационных сил, связанных с нецентральностью гравитационного поля Земли, на эволюцию орбиты космического аппарата // Труды МАИ. – 2007. – № 26. – С. 5.

6. Pryanichnikov VE, et al. Technologies of Modernization and Sensorics Enhancement for Special Purpose Mobile Robots. Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2011;116(3):166-171.

7. Mulyukha VA, et al. The Results of the Space Experiment "Kontur-2" Dedicated to the Development of Technologies for Remote Control of On-Planet Robotic Objects. Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2017;9(194):153-169.

8. Sergeev AV, Sergeev SF. Induced Environment of the Immersive Interface for Mobile Space Robot. In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on the Human Factor in Complex Technical Systems and Environments (Ergo-2018): 2018. p. 211-217.

9. Sergeev A.V., Guk M.Yu. Controlling a Mobile Robot for Space Purposes Using Virtual Reality and Force-Torque Sensitivity. Manned Flights Into Space. 2018;4:44.

10. Vaschenko A.V. Influence of Disturbing Gravitational Forces Associated With the Non-Centrality of the Earth's Gravitational Field on the Evolution of a Spacecraft Orbit. Trudy MAI. 2007;26:5.

#### **Информация об авторах:**

##### **Брич Иван Александрович**

аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

##### **Шептунов Сергей Александрович**

доктор технических наук, директор Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

#### **Information about the authors:**

##### **Brich Ivan Alexandrovich**

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

##### **Sheptunov Sergey Alexandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

**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 06.05.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 09.06.2024.**

**The article was submitted 06.05.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 09.06.2024.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.3:621.43

doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-41-52

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА ДВС АВТОМОБИЛЯ С БЕССТУПЕНЧАТОЙ КОРОБКОЙ ПЕРЕДАЧ

**Александр Алексеевич Реутов**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

bgtu2012@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1703-6654>, <http://orcid.org/0000-0003-1117-8536>

**Аннотация.** Целью работы является создание компьютерной динамической модели движения деталей ДВС и бесступенчатой коробки передач (КП) для определения характеристик пуска ДВС. Задача исследования состоит в определении характеристик движения деталей ДВС и бесступенчатой КП при пуске ДВС электростартером. Методы: компьютерное моделирование движения деталей ДВС и КП при пуске электростартером. Новизна работы состоит в создании компьютерной модели движения деталей ДВС и бесступенчатой КП, соединенных демпфером крутильных колебаний с учетом изменения параметров трения. Результаты: разработана компьютерная модель для определения характеристик пуска четырехцилиндрового рядного четырехтактного ДВС с искровым зажиганием и бесступенчатой КП multitronic® 01J. Для проверки адекватности компьютерной модели использованы величины среднего давления трения по ГОСТ Р 54120-2010, эмпирические данные неравномерности угловой скорости коленвала. Моделирование четырехэтапного пуска ДВС показало, что открытие клапанов цилиндров на 1-м этапе увеличивает угловую скорость коленвала на 4 %. Временное (на 1,4 с) включение фрикциона заднего хода снижает амплитуду угловых колебаний солнечного вала в 2,22 раза, устраняет биения контактирующих зубьев КП, но затормаживает скорость коленвала на 7,6 %. После выключения фрикциона заднего хода происходят периодические изменения угловой скорости деталей КП.

**Ключевые слова:** компьютерная модель, автомобиль, ДВС, multitronic®, универсальный механизм

**Для цитирования:** Реутов А.А. Моделирование пуска ДВС автомобиля с бесступенчатой коробкой передач // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №2 (24). С. 41-52. doi: 10.30987/2658-6436-2024-2-41-52.

Original article

Open Access Article

## SIMULATION OF STARTING AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE OF A CAR WITH A CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION

**Alexander A. Reutov**

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

bgtu2012@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1703-6654>, <http://orcid.org/0000-0003-1117-8536>.

**Abstract.** The aim of the work is to build a computer dynamic model of moving internal combustion engine parts and a continuously variable transmission to determine the starting characteristics of the internal combustion engine. The paper objective is to define the characteristics of moving parts of the internal combustion engine and continuously variable transmission when starting the internal combustion engine with an electric starter. The research method is computer modelling of moving internal combustion engine and transmission parts when starting with an electric starter. The novelty of the work lies in building a computer model of moving parts of an internal combustion engine and a continuously variable transmission, connected by a torsional vibration damper, considering changes in friction parameters. The results are in developing a computer model to determine the starting characteristics of a four-cylinder in-line four-stroke internal combustion engine with spark ignition and a continuously variable multitronic® 01J transmission. To check the computer model adequacy, the author uses the values of the average friction pressure in accordance with GOST R 54120-2010 and empirical data on the unevenness of the angular velocity of the crankshaft. Simulating a four-stage start of an internal combustion engine shows that opening the cylinder valves at the 1st stage increases the angular velocity of the crankshaft by 4%. Temporary switching on the reverse clutch for 1.4 s reduces the amplitude of angular oscillations of the solar shaft by 2.22 times, eliminates the beating of the contacting gearbox teeth, but slows down the crankshaft speed by 7.6%. After the reverse clutch is turned off, periodic changes in the angular velocity of gearbox parts occur.

**Keywords:** computer model, car, internal combustion engine, multitronic®, universal mechanism

## Введение

Для пуска автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) созданы разнообразные конструкции стартеров, включающие электродвигатель (ЭД), аккумуляторную батарею и другие узлы. Совершенствованию стартеров посвящены многочисленные работы, целью которых является повышение эффективности и надежности работы стартера, особенно при низких температурах окружающей среды.

Запуск автомобильного ДВС – это быстротекущий динамический процесс с большими ускорениями. Начало и конец запуска определяют моменты времени включения и выключения стартера. Длительность попытки запуска согласно ГОСТ Р 54120-2010 составляет не более 10 с для бензиновых и не более 15 с для дизельных ДВС.

Много исследований посвящено координации работы и управлению ДВС, ЭД и сцеплением гибридных автомобилей. Исследования направлены на минимизацию времени запуска ДВС, обеспечение плавности работы трансмиссии.

В [1] с использованием Simcenter Amesim создали динамическую модель и предложили четырехступенчатую стратегию управления запуском ДВС, включающую раскручивание колена, зажигание, подготовку и блокировку. Стратегия проверена на испытательном стенде, однако, разница скоростей дисков сцепления и пульсации крутящего момента ДВС не учтены. Более точная модель сцепления, учитывающая разницу скоростей дисков разработана в [2]. Тем не менее ДВС не включен в процесс синхронизации скоростей, что приводит к замедлениям в работе.

В [3] представлена система регулирования запуска ДВС с активным гашением колебаний ременного привода стартер-генератора, выполненного на базе асинхронной машины с использованием общей шины постоянного тока 48 В. Проектирование системы управления основано на критерии оптимального демпфирования и позволило получить аналитические зависимости контроллера демпфирования замкнутой системы регулирования. Система регулирования была первоначально протестирована в среде MATLAB/Simulink с использованием упрощенной двухмассовой модели, затем с использованием многомассовой модели в AVL EXCITE™. При моделировании динамики всего автомобиля в среде AVL CRUISE™ предложенная система регулирования подтвердила пригодность использования в гибридной силовой установке автомобиля.

В [4] решена задача оптимального управления пуском ДВС гибридного автомобиля на основе модели рабочего процесса четырехтактного ДВС. Получен аналитический закон оптимального управления процессом запуска ДВС, хотя крутящий момент ДВС не использован при синхронизации скоростей.

В [5] с использованием ПИД-контроллера разработана стратегия переключения передач и запуска двигателя, основанная на правилах. В [6] представлены общие правила запуска двигателя гибридного привода автомобиля с использованием ПИД-контроллера. Алгоритм управления с прогнозированием применяется многими исследователями. Стратегия управления на основе правил и прогнозирования используется в процессе запуска ДВС для устранения перебоев в подаче электроэнергии [7].

В [8, 9] график давления в цилиндрах двигателя использован для моделирования крутящего момента, и предложена эмпирическая стратегия запуска двигателя. Использование для моделирования пуска ДВС усредненных зависимостей крутящего момента стартера, момента сопротивления вращению двигателя приводит к получению усредненных результатов, а экстремальные значения кинематических и силовых факторов остаются неопределенными. Для определения оптимальных параметров процесса и системы запуска ДВС необходима динамическая модель движения деталей ДВС и трансмиссии.

Целью работы является создание компьютерной динамической модели движения деталей ДВС и бесступенчатой коробки передач (КП) для определения характеристик пуска ДВС.

## Описание компьютерной модели ДВС со стартером

В качестве объекта моделирования рассмотрим четырехцилиндровый рядный четырехтактный бензиновый ДВС с искровым зажиганием. Все компьютерные динамические модели в настоящей работе созданы в среде программного комплекса «Универсальный механизм» (далее УМ-модели).

УМ-модель ДВС включает 9 тел: коленвал с маховиком, 4 шатуна, 4 поршня. Коленвал с неподвижным корпусом двигателя (блоком цилиндров), шатуны с коленвалом и поршнями соединены шарнирами вращения. Движущиеся в цилиндрах поршни имеют две степени свободы (в вертикальном и горизонтальном направлениях).

Давление газов в камере сгорания  $i$ -го цилиндра  $p_i$  разделим на две составляющие  $p_{1i}$  и  $p_{2i}$ .  $p_{1i}$  – давление газов сгораемого топлива,  $p_{2i}$  – давление газов согласно развернутой диаграмме без учета  $p_{1i}$ . Вертикальная сила давления газов  $F_i$ , действующая  $i$ -й поршень, зависит от площади поршня  $S$ , коэффициента подачи топлива  $k_\omega$  и угла поворота коленвала относительно корпуса  $\varphi$ :

$$F_i(\varphi) = S[k_\omega p_{1i}(\varphi) + p_{2i}(\varphi)], \quad i = 1 \dots 4.$$

Данные экспериментальных исследований показывают, что внутреннее сопротивление ДВС (среднее давления трения  $p_T$ ) почти линейно зависит от угловой скорости коленвала  $\omega_e$  и намного меньше зависит от рабочей нагрузки двигателя. В [10] получена линейная регрессионная зависимость  $p_T$  от средних значений давления газов  $p_i$ , скорости поршня, силы упругости поршневых колец, температуры моторного масла, кинематической вязкости моторного масла  $\xi$  при 100 °С.

Внутреннее сопротивление в УМ-модели ДВС представлено моментами сил трения в шарнирах коленвала, шатунов, силами трения поршней о стенки цилиндров.

Момент сил трения в шарнире вращения коленвала относительно корпуса  $M_{Crank}$  представим линейной зависимостью:

$$M_{Crank} = d_{Cr0} + d_{Cr1}\omega_e,$$

где  $d_{Cr0}$ ,  $d_{Cr1}$  – коэффициенты трения коленвала.

Момент  $M_{Crank}$  учитывает сопротивление электрогенератора, насосов и других механизмов, соединенных с коленвалом.

Моменты сил трения в шарнирах вращения шатунов относительно коленвала и относительно поршней представлены формулами:

$$M_{RodCr} = d_{Rod0} + d_{Rod1}\omega_{ci}, \quad M_{RodP} = d_{Rod0} + d_{RP1}\omega_e + d_{RP2}p_i,$$

где  $d_{Rod0}$ ,  $d_{RP1}$  и  $d_{RP2}$  – коэффициенты трения в шарнирах, соединяющих шатун с поршнем и коленвалом;  $\omega_{pi}$  и  $\omega_{ci}$  – угловые скорости шатуна относительно поршня и шатуна относительно коленвала  $i$ -й поршневой группы. Индекс номера шатуна  $i$  в обозначениях моментов  $M_{RodP}$  и  $M_{RodCr}$  опущен.

Таким образом, внутреннее сопротивление в УМ-модели ДВС линейно зависит от угловой скорости коленвала и давления газов  $p_i$ .

При создании модели силы трения поршней о стенки цилиндров учтем рекомендацию [10] применения универсальной зависимости, учитывающей гидродинамическое, смешанное и граничное трения. Силы трения поршней представлены контактными силами «точки-плоскость». На  $i$ -й поршень в вертикальном направлении действует сила трения  $F_{fi}$ :

$$F_{fi} = fN_i,$$

где  $N_i$  – нормальная реакция контакта  $i$ -го поршня с цилиндром. Силы  $N_i$  учитывают упруго-вязкие свойства контактирующих поверхностей поршня и поршневых колец в нормальном направлении.

Переход от трения скольжения к трению покоя происходит, когда скорость скольжения меняет направление на противоположное.

Зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости скольжения  $V_s$  реализована экспоненциальной моделью [11]:

$$f(V_S) = f_\infty + (f_0 - f_\infty) / \exp(V_S / v_{str})^\delta + vV_S,$$

где  $f_0$  и  $f_\infty$  – приведенные коэффициенты трения при  $V_S = 0$  и при  $V_S = \infty$ ;  $v_{str}$  – скорость скольжения, определяющая интервал экспоненциального снижения  $f$ ;  $\delta$  – эмпирический показатель степени,  $v$  – коэффициент вязкого трения моторного масла.

Вязкость моторного масла сильно зависит от его температуры. ГОСТ 17479.1-2015 нормирует пределы кинематической вязкости  $\xi$  всех классов масел при 100 °С, а для зимних и всесезонных сортов дополнительно нормируется максимальная величина  $\xi$  при температуре -18° С. Так верхняя оценка  $\xi$  масла класса 5з/10, соответствующего 15W-30, уменьшается в 521,8 раза при увеличении температуры с -18 °С до 100 °С.

Скорость прогрева масла при пуске ДВС мала. Масло в картере ДВС нагревается медленно, поскольку сам блок цилиндров и остальные детали холодные. Так по данным датчиков автомобиля после 1 мин работы двигателя температура масла (-12 °С) не изменилась, хотя температура охлаждающей жидкости увеличилась на 6 °С. Однако величина коэффициента вязкого трения  $v$  определяется температурой слоя масла в парах трения, а не в картере двигателя.

Температурная зависимость динамической вязкости трансмиссионного масла носит экспоненциальный характер [12]. Для учета быстрого уменьшения вязкости масла в парах трения при пуске двигателя коэффициент вязкого трения  $v$  представим управляемым идентификатором, экспоненциально уменьшающимся с ростом угла поворота коленвала  $\varphi$ :

$$v = v_1 + (v_0 - v_1) / \exp(\varphi / 2)^{0,2},$$

где  $v_0$  и  $v_1$  – значения коэффициента  $v$  в начале и конце пуска двигателя.

Если при  $\varphi = 0$   $v = v_0$  и  $v_1 = v_0/7,2$ , то после 10 полных оборотов коленвала  $\varphi = 62,83$  рад  $v = v_0/7,1$ , после 20 полных оборотов коленвала  $v = v_0/7,2$ . Аналогичными экспоненциальными зависимостями от угла  $\varphi$  представим коэффициенты трения шарниров вращения коленвала  $d_{Cr0}$  и шатунов  $d_{Rod0}$ .

Величина крутящего момента стартера с ЭД постоянного тока зависит от угловой скорости вала ЭД и типа возбуждения якоря. Для стартера с ЭД постоянного тока и параллельным возбуждением примем линейную зависимость от  $\omega_e$  крутящего момента  $M_{Start}$ , передаваемого на коленвал:

$$M_{Start} = M_{S0} [1 - \exp(-200t)] - k_S \omega_e,$$

где  $M_{S0}$  и  $k_S$  – коэффициенты;  $t$  – время.

### Описание работы КП при неподвижном автомобиле

Во многих автомобилях коленвал ДВС соединяют КП через демпфер крутильных колебаний (ДКК). В автомобилях Audi с бесступенчатой КП multitronic® 01J [13] ДКК соединяет маховик ДВС с валом солнечной шестерни планетарного механизма (ПМ) и имеет несколько наборов пружин разной жесткости.

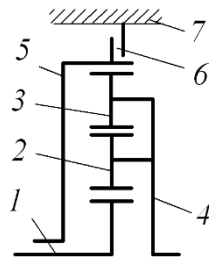
Два фрикциона КП служат для включения переднего или заднего хода автомобиля. Стальные диски фрикциона переднего хода соединены с солнечной шестерней, а металлокерамические диски – с водилом ПМ. Металлокерамические диски фрикциона заднего хода соединены с коронным колесом ПМ, а стальные диски – с картером КП.

При запуске двигателя оба фрикциона выключены, а колеса автомобиля заторможены. Водило ПМ остановлено, и солнечный вал вращает колеса ПМ вхолостую. Остальные части трансмиссии (промежуточная и главная передачи, вариатор, дифференциал) заблокированы, поэтому в моделировании не участвуют.

### Описание компьютерной модели части КП multitronic® 01J

УМ-модель рассматриваемой части КП включает 5 тел: солнечный вал, два сателлита, водило и коронное колесо (рис. 1).





**Рис. 1. Схема ПР КП multitronic® 01J:**

1 – солнечный вал; 2 и 3 – сателлиты; 4 – водило; 5 – коронное колесо; 6 – диски фрикциона заднего хода; 7 – картер КП

**Fig. 1. Diagram of the multitronic® 01J gearbox:**

1 – sun shaft; 2 and 3 – satellites; 4 – carrier; 5 – crown wheel; 6 – reverse clutch discs; 7 – gearbox housing

УМ-модель ДВС имеет 5 степеней свободы, УМ-модель части КП – 2 степени свободы. Солнечный вал, водило и коронное колесо соединены с корпусом КП шарнирами вращения. Оба сателлита соединены шарнирами вращения с водилом.

Моменты сил трения в шарнирах вращения представлены квадратичными зависимостями от соответствующей угловой скорости.

УМ-модель ДКК содержит два тела, соединенных комплектом пружин. Первое тело – это коленвал с маховиком, второе тело – солнечный вал ПМ.

Упругую составляющую крутящего момента  $M_s$ , возникающую при относительном движении маховика и солнечного вала, представим кусочно-линейной зависимостью  $M_s(\alpha)$  [14], где  $\alpha$  – угол поворота маховика относительно вала солнечной шестерни. Каждый  $j$ -й участок зависимости  $M_s(\alpha)$  задан коэффициентом пропорциональности  $k_j$  и углом  $\alpha_j$ , соответствующим концу участка. Вязкая составляющая крутящего момента  $M_s$  линейно зависит от угловой скорости вращения солнечного вала относительно коленвала.

УМ-модель КП содержит 3 зубчатых зацепления: солнечного вала с 1-м сателлитом, 1-го сателлита с 2-м сателлитом, 2-го сателлита с коронным колесом с передаточными числами  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$  соответственно. УМ-модель зубчатого зацепления представляет контактное взаимодействие зубьев колес в зацеплении [15]. Уравнения модели зацепления описывают силу, действующую перпендикулярно плоскости, проходящей через оси вращения колес. Для каждого зубчатого зацепления необходимо задать положение осей вращения колес, передаточное число, величину зазора между контактирующими зубьями, коэффициенты жесткости и диссипации передачи, приведенные к точке контакта.

### Валидация компьютерной модели

Известные эмпирические формулы для расчета момента сопротивления при пуске ДВС [16 и др.] не позволяют с приемлемой точностью проводить валидацию компьютерной модели, поскольку не содержат сведений о допустимых интервалах используемых параметров. При определении характеристик пуска ДВС важно оценить адекватность выходных функций компьютерной модели ДВС – скорости и крутящего момента коленвала.

Для валидации принятых зависимостей трения поршней и шарниров ДВС вычислим средний момент сопротивления проворачиванию коленвала  $M_T$  по результатам моделирования ДВС без КП и сравним со значением, соответствующим ГОСТ Р 54120-2010:

$$M_T = p_T V_h / 0,01257 \text{ (Нм)}, \quad (1)$$

где  $p_T$  – среднее давления трения (МПа),  $V_h$  – рабочий объем двигателя, л.

При температуре пуска бензинового ДВС  $-20$  °С  $p_T = 0,51$  МПа, минимальная частота вращения коленвала – 70 об/мин (7,33 рад/с). ГОСТ Р 54120-2010 не определяет методику вычисления или замера  $M_T$ , поэтому величины  $p_T$  и  $M_T$  следует рассматривать как ориентировочные.

УМ-модель ДВС имеет следующие параметры (указаны в единицах международной системы):  $d_{C70} = 4$ ,  $d_{C71} = 1,02$ ,  $d_{Rod0} = 1$ ,  $d_{RP1} = 0,3$ ,  $d_{RC71} = 0,25$ ;  $f_{C0} = 0,13$  и  $f_{\infty} = 0,12$ ;  $v_{str} = 14,65$ ;  $\delta = 3,9$ ;  $v_0 = 0,0022$ ;  $\max p_{1i} = 1,29E4$  – максимальное давление газов сгораемого топлива,  $\max p_{2i} = 2,96E3$  – максимальное давление газов без сгорания топлива;  $S = 5,153E-3$ ;

$J_{Crank} = 1,5$  – момент инерции коленвала с маховиком;  $M_{S0} = 150$ ,  $k_S = 8$ .

При моделировании пуска двигателя к коленвалу приложен внешний крутящий момент стартера  $M_{Start}$ . Через 1,5 с после пуска средняя величина  $\omega_e$  достигла 10,9, а средняя величина  $M_{Start} = 63$ . Неравномерность угловой скорости коленвала:

$$\Delta\omega_e = \max \omega_e - \min \omega_e = 4,24.$$

Расчетное значение  $M_T = 66,7$  по формуле (1) соответствует  $V_h = 1,64$  л. Неравномерность угловой скорости коленвала сопоставима с результатами [17].

### Моделирование четырехэтапного пуска ДВС

Рассмотрим процесс запуска двигателя с включения стартера. С подачей напряжения на обмотки ЭД стартер передает крутящий момент коленвалу.

Смоделируем 4 этапа процесса запуска двигателя.

1-й этап пуска с открытыми клапанами цилиндров без подачи топлива длительностью  $t_1$ . 1-й этап учитывает только давление впуска и выпуска воздуха в цилиндры согласно развернутой диаграмме.

2-й этап пуска с клапанами цилиндров, работающими в рабочем режиме. На 2-й этапе топливо в цилиндрах не вспыхивает. Учитывается только давление  $p_{2i}$  в цилиндрах согласно развернутой диаграмме.  $t_2$  – время окончания 2-го этапа.

3-й этап пуска с клапанами цилиндров, работающими в рабочем режиме и воспламенением топлива в цилиндрах. На этом этапе стартер продолжает работать.  $t_3$  – продолжительность работы стартера (время окончания 3-го этапа). Время начала воспламенения топлива  $t_2$  при моделировании задаем с учетом ГОСТ Р 54120-2010. Например, по условию  $\omega_e \geq 7,33$  рад/с.

4-й этап пуска отличается от 3-го этапа выключением стартера.  $t_4$  – время окончания 4-го этапа.

На этапах 3 и 4 учтем увеличение уровня подачи топлива изменением коэффициента  $k_\omega$ :

$$k_\omega = k_{\omega 0} (1 - \omega_e / \omega_{Idle}) + k_{\omega 1} \omega_e / \omega_{Idle},$$

где  $k_{\omega 0}$  и  $k_{\omega 1}$  – значения коэффициента  $k_\omega$  при  $\omega_e = 0$  и  $\omega_e = \omega_{Idle}$ ;  $\omega_{Idle}$  – угловая скорость коленвала при работе двигателя на холостых оборотах.

Давление  $p_{2i}$  соответствует развернутой диаграмме.

В дополнение к параметрам УМ-модели, использованным при валидации, при моделировании четырехэтапного пуска ДВС применены следующие параметры:

$t_1 = 0,7$ ,  $t_2 = 1,5$ ,  $t_3 = 2$ ;  $\omega_{Idle} = 80$ ,  $k_{\omega 0} = 1$  и  $k_{\omega 1} = 3$ ;  $\alpha_j = \{0,349, 0,698, 0,96\}$ ;  $k_j = \{171,9; 1794; 3469\}$ ;  $J_{sun} = 0,003$ ;  $J_{ann} = 0,03$ ;  $J_{sat} = 1,0E-4$  – моменты инерции солнечного вала, коронного колеса и сателлитов; коэффициенты трения в шарнирах вращения солнечный вал-коленвал  $d_{fly} = 0,01$ , солнечный вал-корпус КП – 0,001 и 2E-5, коронное колесо-корпус КП 0,002 и 3E-5; передаточные числа  $u_1 = 2$ ,  $u_2 = 1$ ,  $u_3 = 0,25$ .

Для переключения этапов в компьютерной модели используются идентификаторы *Step*, *Start* и *Combustion*. Значения *Step* = 0 и *Step* = 1 соответствуют открытым клапанам цилиндров и клапанам, работающим в рабочем режиме. Значения *Start* = 1 и *Start* = 0 соответствуют режимам работы и отключения стартера. Значения *Combustion* = 0 и *Combustion* = 1 соответствуют режимам отсутствия и наличия воспламенения топлива в цилиндрах.

Рассчитаем по результатам моделирования следующие характеристики пуска ДВС:

– среднюю за оборот угловую скорость коленвала  $\omega_m$ ;

– неравномерность угловой скорости коленвала  $\Delta\omega_e$  и коронного колеса  $\Delta\omega_{ann}$ :

$$\Delta\omega_{ann} = \max \omega_{ann} - \min \omega_{ann};$$

– максимальные величины спектральной плотности мощности функций  $\omega_{ann}(t)$  и  $\alpha(t)$ .

На рис. 2 приведены графики изменения угловой скорости коленвала  $\omega_e$  и коронного колеса  $\omega_{ann}$  в интервале времени  $t \in [0; 2]$ . На рис. 2...7 по оси абсцисс отложено время, с.

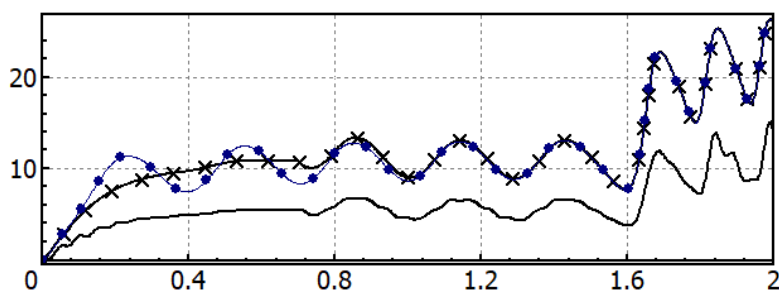


Рис. 2. Графики изменения угловой скорости коленвала  $\omega_e$  (линия, маркированная крестиками, при  $t_1 = 0,7$ ; линия, маркированная кружками, при  $t_1 = 0$ ), угловой скорости коронного колеса  $\omega_{ann}$  (немаркированная линия  $t_1 = 0,7$ )

Fig. 2. Graphs of changes in the angular velocity of the crankshaft  $\omega_e$  (line marked with crosses, at  $t_1 = 0,7$ ; line marked with circles, at  $t_1 = 0$ ), angular velocity of the crown wheel  $\omega_{ann}$  (unmarked line  $t_1 = 0,7$ )

При  $t_1 = 0,7$  через 0,7 с после пуска средняя за оборот угловая скорость коленвала  $\omega_m$  достигла 10,8. Через 1,4 с после пуска неравномерность угловой скорости коленвала  $\Delta\omega_e$  равна 4,12. Через 0,85 с после пуска  $\omega_e = 13,3$ .

При  $t_1 = 0$  через 0,85 с после пуска  $\omega_e = 12,8$ . То есть, открытие клапанов цилиндров на 1-м этапе увеличило  $\omega_e$  на 4 %. После воспламенения топлива в цилиндрах  $t > 1,5$  осцилляции угловых скоростей увеличились.

Частота главных пульсаций крутящего момента (частота вспышек топлива в цилиндрах) четырехцилиндрового четырехтактного ДВС  $\nu_e$  пропорциональна  $\omega_m$ :

$$\nu_e = \omega_m / \pi \text{ (Гц)}. \quad (2)$$

В одномассовой линейной системе резонанс крутильных колебаний солнечного вала относительно коленвала [14] происходит, если:

$$\omega_m = [k_o / J_o - 2(d_o / J_o)^2]^{0,5} / 2 \text{ (рад/с)}, \quad (3)$$

где  $k_o$ ,  $J_o$ ,  $d_o$  – приведенные к солнечному валу величины коэффициента жесткости пружин ДКК, момента инерции деталей КП, коэффициента трения ДКК и КП.

На рис. 3 приведены графики изменения угловых скоростей коленвала  $\omega_e$  и коронного колеса  $\omega_{ann}$  при  $t_1 = 0$ ,  $d_{fly} = 0,01$  и  $d_{fly} = 0,1$ .

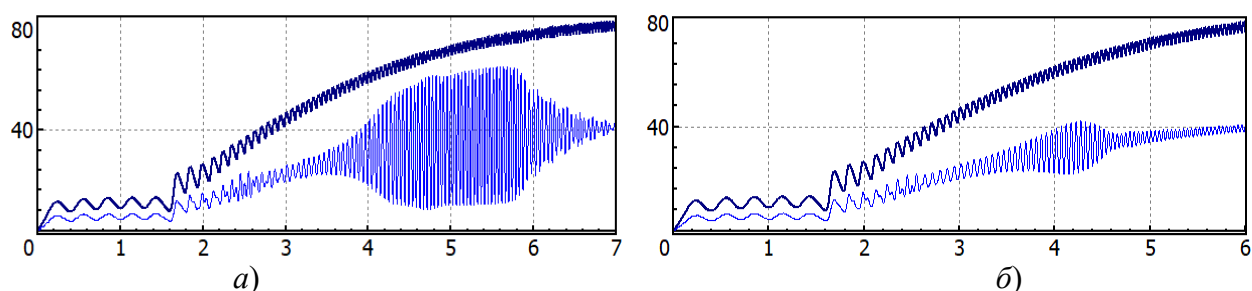


Рис. 3. Графики изменения угловой скорости коленвала  $\omega_e$  (утолщенная линия) и угловой скорости коронного колеса  $\omega_{ann}$ :

$$a - d_{fly} = 0,01 \text{ и } б - d_{fly} = 0,1$$

Fig. 3. Graphs of changes in the angular velocity of the crankshaft  $\omega_e$  (thickened line) and angular velocity of the crown wheel  $\omega_{ann}$ :

$$a - d_{fly} = 0,01 \text{ and } б - d_{fly} = 0,1$$

Из рис. 3 видно, что при  $t \in [5; 5,5]$  и  $t \in [3,8; 4,5]$  происходит резонансное увеличение осцилляций угловой скорости коронного колеса  $\omega_{ann}$ . Увеличение коэффициента демпфирования ДКК  $d_{fly}$  с 0,01 до 0,1 снизило  $\Delta\omega_e$  в 1,57 раза,  $\Delta\omega_{ann}$  в 2,5 раза,  $\omega_m$  на 0,44 % с 78,46 до 78,12 ( $t = 6$ ). Амплитуда  $a_\alpha$  осцилляций угла  $\alpha$  поворота солнечного вала относительно коленвала снизилась с 0,4 рад до 0,16 рад соответственно. Таким образом, при  $d_{fly} = 0,01$  задействованы два комплекта пружин ДКК, при  $d_{fly} = 0,1$  работает только один комплект пружин ДКК.

При  $t \in [5; 5,5]$  ( $d_{fly} = 0,01$  см. рис. 3, а)  $\omega_m = 73,97$ ,  $\Delta\omega_e = 10,6$ ,  $\Delta\omega_e = 0,143\omega_m$ . При  $t = 6$

( $d_{fly} = 0,1$  см. рис. 3, б) осцилляции угловых скоростей заметно снизились:  $\omega_m = 78,12$ ,  $\Delta\omega_e = 0,05\omega_m$ . Для сравнения с данными [17]: у 4-цилиндрового 4-тактного ДВС мощностью 50 кВт при 3000 об/мин  $\Delta\omega_e = 0,021\omega_m$ .

При спектральном анализе крутильных колебаний шаг представления результатов  $t_r$  должен обеспечивать превышение частотой дискретизации удвоенного значения наибольшей частоты преобразуемой переменной [18]:

$$t_r \leq \pi / \max(2\omega_m / \eta),$$

где  $\eta$  – отношение угловой скорости коленвала к угловой скорости детали.

При моделировании пуска  $\omega_m \leq \omega_{idle}$ ,  $\min(\eta) = 0,5$  для сателлитов ПМ. Поэтому  $t_r \leq 0,01$ .

В табл. 1 и табл. 2 приведены характеристики пуска ДВС и спектрального анализа крутильных колебаний (см. рис. 2), вычисленные по результатам моделирования.

Таблица 1

**Характеристики пуска ДВС**

Table 1

*Engine starting characteristics*

$t$	$\nu_e$	$\omega_m$	$\Delta\omega_e$	$\Delta\omega_{ann}$
3,5...3,8	19,5	55,1...59,2	8,7	13,8
3,8...4,5	19,5	59,2...67,2	11,9	20,0
5,0...5,5	23,4	72,2...75,7	7,6	55,0
5,5...6,0	23,4	75,7...78,3	6,2	54,5

Таблица 2

**Результаты спектрального анализа крутильных колебаний**

Table 2

*Results of spectral analysis of torsional vibrations*

$t$	$\nu_s$	$\omega_R$	$S_{ann}$	$S_\alpha$	Вид вынужденных колебаний
3,5...3,8	15,60	49,1	1,93	0,0004	Колебания в дорезонансной зоне $\omega_R > \omega_m$
3,8...4,5	19,53	61,4	19,98	0,0052	Колебания в резонансной зоне $\omega_R \in \omega_m$
5,0...5,5	23,44	73,6	74,78	0,0138	Колебания в резонансной зоне $\omega_R \in \omega_m$
5,5...6,0	23,44	73,6	79,63	0,0138	Колебания в зарезонансной зоне $\omega_R < \omega_m$

Примечание: В табл. 1  $\nu_e$  – резонансная частота вынужденных колебаний деталей ПМ, рассчитанная по формуле (3).  $\nu_s$  – частота пиков спектральной плотности мощности  $\omega_{ann}(t)$ ,  $\alpha(t)$  и др.  $\omega_R$  – угловая скорость коленвала, соответствующая частоте  $\nu_s$  согласно (2),  $S_{ann}$  – максимальная величина (пик) спектральной плотности мощности  $\omega_{ann}(t)$ ,  $S_\alpha$  – максимальная величина (пик) спектральной плотности мощности  $\alpha(t)$ .

При  $t \in [3,5; 4,5]$   $k_o = 171,9$ ,  $J_o = 0,0113$ ,  $d_o = 0,1152$ . При  $t \in [5; 6]$   $k_o = 245,1$ ,  $J_o = 0,0113$ ,  $d_o = 0,0115$ .

Из табл. 1 и табл. 2 следует, что увеличение коэффициента демпфирования ДКК  $d_{fly}$  с 0,01 до 0,1 меняет режим работы ДКК, в результате чего изменилась резонансная частота вынужденных колебаний деталей ПМ с 23,44 до 19,53. При этом пиковая величина спектральной плотности мощности  $\omega_e(t)$  увеличилась в 1,97 раза,  $S_{ann}$  и  $S_\alpha$  уменьшились в 3,99 и 2,65 раза соответственно.

Известно, что увеличение момента инерции маховика снижает неравномерность вращения коленвала ДВС. По результатам моделирования увеличение  $J_{Crank}$  в 2 раза с 1,5 до 3 ( $d_{fly} = 0,01$ ) снизило максимальные значения  $\Delta\omega_e$  в 4,33 раза с 10,6 до 2,45,  $\Delta\omega_{ann}$  уменьшились в 2,29 раза с 55 до 24,  $\omega_m$  уменьшились в 1,3 раза ( $t = 6$ ),  $a_\alpha$  снизилась в 2,03 раза с 0,4 до 0,197. Пик спектральной плотности мощности  $S_\alpha = 0,0082$  соответствует частоте 19,5.

Для снижения неравномерности вращения деталей ПМ применим временное включение фрикциона заднего хода. Пусть в интервале времени  $t \in [3,8; 5,2]$  на коронное колесо действует тормозящий момент:

$$M_{ann} = d_{ann} \omega_{ann},$$

где  $d_{ann}$  – коэффициент торможения коронного колеса.

На рис. 4 и рис. 5 приведены графики изменения угловых скоростей коленвала  $\omega_e$  и коронного колеса  $\omega_{ann}$ , угла  $\alpha$  поворота солнечного вала относительно коленвала при включении фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$  ( $t_1 = 0$ ,  $d_{fly} = 0,01$ ,  $d_{ann} = 0,8$ ).

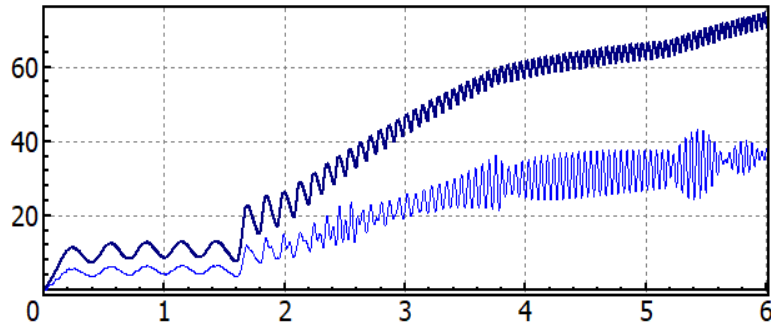


Рис. 4. Графики изменения угловой скорости коленвала  $\omega_e$  (утолщенная линия), угловой скорости коронного колеса  $\omega_{ann}$  при включении фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$

Fig. 4. Graphs of changes in the angular velocity of the crankshaft  $\omega_e$  (thickened line), angular velocity of the crown wheel  $\omega_{ann}$  when the reverse clutch is engaged at time  $t \in [3,8; 5,2]$

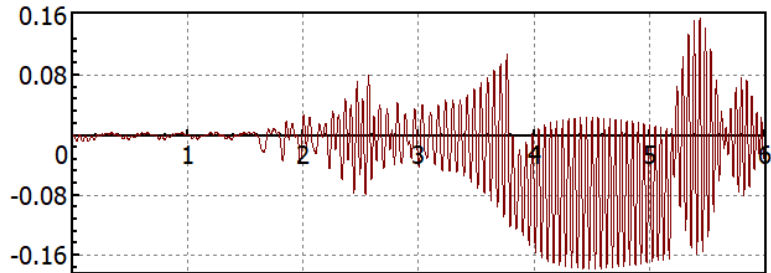


Рис. 5. График изменения угла поворота солнечного вала относительно коленвала  $\alpha$  при включении фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$

Fig. 5. Graph of changes in the angle of rotation of the sun shaft relative to the crankshaft  $\alpha$  when the reverse clutch is engaged at time  $t \in [3,8; 5,2]$

На графиках изменения  $\omega_{ann}$  и  $\alpha$  видны биения при  $t > 5,2$  с из-за близости частоты пульсаций крутящего момента ДВС частоте собственных колебаний ДКК. Амплитуда  $a_\alpha$  достигает 0,18. Временное (на 1,4 с) увеличение коэффициента торможения коронного колеса  $d_{ann}$  с 0,002 до 0,8 снижает амплитуду  $a_\alpha$  в 2,22 раза с 0,4 рад до 0,18, но затормаживает разгон коленвала  $\omega_m$  на 7,6 % с 78,36 до 72,41.

Рассмотрим влияние амплитуды угловых колебаний валов КП на характер контактного взаимодействия зубьев колес. При незначительной амплитуде контакт зубьев смежных колес не прекращается на всей длине линии контакта. При большой амплитуде возможно периодическое прекращение контакта передних поверхностей зубьев с ударным контактом задними поверхностями. Это явление происходит, если амплитуда линейных перемещений точки контакта зуба превышает зазор между зубьями.

На рис. 6 показаны графики изменения угла  $\alpha_{s21}$  поворота сателлита 2 относительно сателлита 1 без включения фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$  ( $t_1 = 0$ ,  $d_{fly} = 0,1$ ,  $d_{ann} = 0$ ).

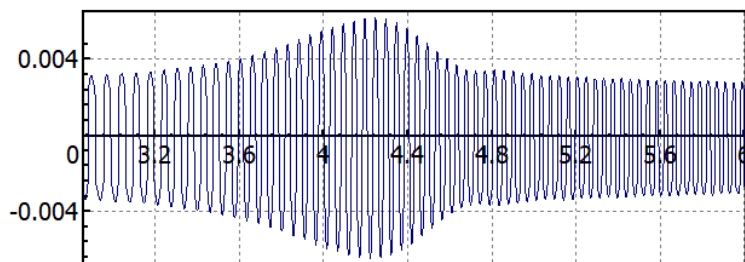


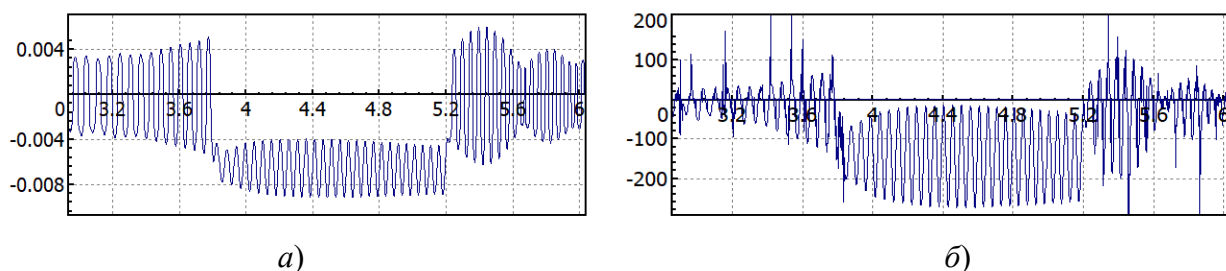
Рис. 6. График изменения угла  $\alpha_{s21}$  поворота сателлита 2 относительно сателлита 1 без включения фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$

Fig. 6. Graph of changes in the angle  $\alpha_{s21}$  of rotation of satellite 2 relative to satellite 1 without turning on the reverse clutch at time  $t \in [3,8; 5,2]$

Амплитуда 0,062 угла  $\alpha_{s21}$  при межосевом расстоянии сателлитов 50 мм соответствует относительному перемещению зубьев сателлитов 0,315 мм, превышающему заданный зазор 0,18 мм. Это означает попеременный контакт зуба одного колеса с двумя соседними зубьями другого колеса, т.е. биение контактирующих зубьев сателлитов.

Увеличение момента инерции коленвала с маховиком  $J_{Crank}$  с 1,5 до 3 ( $d_{fly} = 0,01$ ) снизило амплитуду  $\alpha_{s21}$  до 0,0073 и прекратило биения контактирующих зубьев сателлитов.

На рис. 7 показаны графики изменения угла  $\alpha_{s21}$  поворота сателлита 2 относительно сателлита 1 и силы  $F_{sa}$  контакта сателлита 2 с коронным колесом при включении фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$  ( $t_1 = 0$ ,  $d_{fly} = 0,01$ ,  $d_{ann} = 0,8$ ).



**Рис. 7. Графики изменения угла  $\alpha_{s21}$  поворота сателлита 2 относительно сателлита 1 (а) и силы  $F_{sa}$  (б) контакта сателлита 2 с коронным колесом при включении фрикциона заднего хода во время  $t \in [3,8; 5,2]$**

**Fig. 7. Graphs of changes in the angle  $\alpha_{s21}$  of rotation of satellite 2 relative to satellite 1 (a) and the contact force  $F_{sa}$  (b) of satellite 2 with the crown wheel when the revers clutch is engaged at time  $t \in [3.8; 5.2]$**

Во время включения фрикциона  $t \in [3,8; 5,2]$  среднее значение  $\alpha_{s21}$  не меняет знак, что означает постоянный контакт зубьев без биения. Осцилляции  $\alpha_{s21}$  вызваны податливостью контакта зубьев. Амплитуда 0,026 рад угла  $\alpha_{s21}$  при межосевом расстоянии сателлитов 50 мм соответствует относительному перемещению зубьев сателлитов 0,13 мм, не превышающему заданный зазор 0,18 мм. Это означает отсутствие биения контактирующих зубьев сателлитов. График силы  $F_{sa}$  контакта сателлита 2 с коронным колесом также подтверждает отсутствие биения контактирующих зубьев сателлита и коронного колеса во время  $t \in [3,8; 5,2]$ , так как сила  $F_{sa}$  не меняет знак.

### Заключение

С использованием программного комплекса «Универсальный механизм» разработана компьютерная динамическая модель четырехцилиндрового рядного четырехтактного ДВС с искровым зажиганием и бесступенчатой КП multitronic® 01J. Для проверки адекватности компьютерной модели использованы величины среднего давления трения по ГОСТ Р 54120-2010, эмпирические данные неравномерности угловой скорости коленвала.

Новизна работы состоит в создании компьютерной модели движения деталей ДВС и бесступенчатой КП, соединенных демпфером крутильных колебаний с учетом изменения параметров трения. Динамическая модель пуска ДВС использует зависимость сил трения трибосопряжений ДВС от угла поворота коленвала в начале пуска, учитывает инерционные и демпфирующие характеристики ДКК и ПМ.

В качестве характеристик пуска ДВС рассмотрены средняя за оборот угловая скорость коленвала  $\omega_m$ , неравномерность угловой скорости коленвала  $\Delta\omega_e$  и коронного колеса  $\Delta\omega_{ann}$ , пиковые значения спектральной плотности мощности функций  $\omega_{ann}(t)$  и  $\alpha(t)$ .

Моделирование четырехэтапного пуска ДВС показало, что открытие клапанов цилиндров на 1-м этапе увеличивает угловую скорость коленвала на 4 %.

При пуске происходят резонансные осцилляции угловых скоростей деталей ПМ. Увеличение коэффициента демпфирования ДКК  $d_{fly}$  в 10 раз с 0,01 до 0,1 снизило неравномерность угловой скорости коленвала  $\Delta\omega_e$  в 1,57 раза, неравномерность угловой скорости коронного колеса  $\Delta\omega_{ann}$  в 2,5 раза, среднюю скорость коленвала  $\omega_m$  на 0,44 % с 78,46 до 78,12 ( $t = 6$ ).



Амплитуда осцилляций угла  $a_\alpha$  поворота солнечного вала относительно коленвала уменьшилась в 2,5 раза. При этом максимальная величина спектральной плотности мощности  $\omega_e(t)$  увеличилась в 1,97 раза, максимальные величины спектральной плотности мощности  $\omega_{ann}(t)$  и  $\alpha(t)$  уменьшились в 3,99 и 2,65 раза соответственно.

Существенное снижение неравномерности вращения коленвала и деталей КП обеспечивает увеличение момента инерции маховика. Так увеличение  $J_{Crank}$  в 2 раза с 1,5 до 3 ( $d_{fly} = 0,01$ ) снизило максимальные значения  $\Delta\omega_e$  в 4,33 раза,  $\Delta\omega_{ann}$  в 2,29 раза,  $a_\alpha$  в 2,03 раза, прекратило биения контактирующих зубьев колес КП. Негативным последствием увеличения момента инерции маховика является замедление разгона ДВС:  $\omega_m$  уменьшились в 1,3 раза ( $t = 6$ ).

Временное (на 1,4 с) включение фрикциона заднего хода снижает амплитуду угловых колебаний солнечного вала относительно коленвала в 2,22 раза, устраняет биения контактирующих зубьев КП, но затормаживает скорость коленвала на 7,6 %. После выключения фрикциона заднего хода происходят периодические изменения угловой скорости деталей КП.

Из трех рассмотренных способов снижения неравномерности вращения деталей КП при пуске ДВС увеличение коэффициента демпфирования ДКК меньше двух других способов тормозит разгон коленвала.

Разработанная компьютерная динамическая модель ДВС с бесступенчатой КП может быть использована при разработке новых конструкций поршневых ДВС.

#### Список источников:

1. Smith A., Bucknor, N., Yang, H., and He Y. Controls development for clutch-assisted engine starts in a parallel hybrid electric vehicle. 2011. SAE Paper No. 2011-01-0870.
2. Song M., Oh J., Choi S., Kim Y., and Kim H. Motor control of a parallel hybrid electric vehicle during mode change without an integrated starter generator. J. Electr. Eng. Technol. 2013. 8(4). pp. 930–937.
3. Pavkovic D., Cipek M., Plavac F.; Karlušić J., Krznar M. Internal combustion engine starting and torque boosting control system design with vibration active damping features for a p0 mild hybrid vehicle configuration. Energies. 2022. 15. p. 1311. DOI: 10.3390/en15041311.
4. Kum D., Peng H., and Bucknor N. K. Control of engine-starts for optimal drivability of parallel hybrid electric vehicles. ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. 2013. 135(2), p. 021020.
5. Lei, Z., Sun, D., Liu, Y., Qin, D., Zhang, Y., Yang, Y., and Chen, L. Analysis and Coordinated Control of Mode Transition and Shifting for a Full Hybrid Electric Vehicle Based on Dual Clutch Transmissions. Mech. Mach. Theory. 2017. 114. pp. 125–140.
6. Ning J., Zhu G., and Qu B. Development of an engine start control method for p2 hybrid vehicles in launch situation. IFAC-PapersOnLine. 2018. 51(31). pp. 7–10.
7. Beck R., Richert F., Bollig A., Abel D., and Noreikat K. E. Model predictive control of a parallel hybrid vehicle drivetrain. IEEE Conference on decision and control. European control conference (CDC-ECC). Seville, Spain. 2005. Dec. 15. pp. 2670–2675.
8. Xu X., Wu X., Jordan M., Dong P., and Liu Y. Coordinated engine-start control of single-motor p2 hybrid electric vehicles with respect to different driving situations. Energies. 2018. 11(1). p. 207.
9. Dong P., Wu S., Guo W., Xu X., Wang S., and Liu Y. Coordinated clutch slip control for the engine start of vehicles with p2-hybrid automatic transmissions. Mech. Mach. Theory. 2020. 153(3). p. 103899.

#### References:

1. Smith A., Bucknor, N., Yang, H., He Y. Controls Development for Clutch-Assisted Engine Starts in a Parallel Hybrid Electric Vehicle. 2011. SAE Paper, no. 2011-01-0870.
2. Song M., Oh J., Choi S., Kim Y., Kim H. Motor Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle During Mode Change Without an Integrated Starter Generator. J. Electr. Eng. Technol. 2013;8(4):930-937.
3. Pavkovic D., Cipek M., Plavac F., Karlušić J., Krznar M. Internal Combustion Engine Starting and Torque Boosting Control System Design with Vibration Active Damping Features for a p0 Mild Hybrid Vehicle Configuration. Energies. 2022;15:1311. doi: 10.3390/en15041311
4. Kum D., Peng H., Bucknor N. K. Control of Engine-Starts for Optimal Drivability of Parallel Hybrid Electric Vehicles. ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. 2013;135(2):021020.
5. Lei Z., Sun D., Liu Y., Qin D., Zhang Y., Yang Y., Chen L. Analysis and Coordinated Control of Mode Transition and Shifting for a Full Hybrid Electric Vehicle Based on Dual Clutch Transmissions. Mech. Mach. Theory. 2017;114:125-140.
6. Ning J., Zhu G., Qu B. Development of an Engine Start Control Method for p2 Hybrid Vehicles in Launch Situation. IFAC-PapersOnLine. 2018;51(31):7-10.
7. Beck R, Richert F, Bollig A, Abel D, Noreikat KE. Model Predictive Control of a Parallel Hybrid Vehicle Drivetrain. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control; 2005. Dec. 15; Seville (Spain); 2005. p. 2670-2675.
8. Xu X., Wu X., Jordan M., Dong P., Liu Y. Coordinated Engine-Start Control of Single-Motor p2 Hybrid Electric Vehicles with Respect to Different Driving Situations. Energies. 2018;11(1):207.
9. Dong P., Wu S., Guo W., Xu X., Wang S., Liu Y. Coordinated Clutch Slip Control for the Engine Start of Vehicles with p2-Hybrid Automatic Transmissions. Mech. Mach. Theory. 2020;153(3):103899.

10. Путинцев С.В., Кулешов А.С., Агеев А.Г. Оценка механических потерь современных поршневых двигателей. Двигателестроение. – 2013. – № 2(252). – С. 15-20.

11. Universal Mechanism. Mechanical System as an Object for Modeling. User's manual. 2020. URL: [http://www.uni-versalmechanism.com/download/90/eng/02\\_um\\_technical\\_manual.pdf](http://www.uni-versalmechanism.com/download/90/eng/02_um_technical_manual.pdf) (дата обращения: 23.02.2024).

12. Iqbal S., Al-Bender F., Ompusunggu A.P., Pluymers B., and Desmet W. Modeling and analysis of wet friction clutch engagement dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. 60-61. pp. 420-436.

13. Бесступенчатая автоматическая коробка передач multitronic® 01J. Устройство и принцип действия. Программа самообучения 228. URL: <http://volkswagen.msk.ru> (дата обращения: 23.02.2024).

14. Реутов А.А. Анализ крутильных колебаний деталей трансмиссии автомобиля с двухмассовым маховиком ДВС. Транспортное машиностроение. – 2023. – № 05. – С. 14-25.

15. Universal Mechanism. Driveline Modeling. User's manual. 2020. URL: [http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/22\\_um\\_driveline.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/22_um_driveline.pdf) (дата обращения: 23.02.2024).

16. Дрыга И.А., Костиков О.М., Сазонов С.Н. Методика определения основных параметров пуска ДВС. Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: мат-лы Междун. научно-практ. конф. Ч. II. Воронеж: 2019. – С. 66-72.

17. Девянин С.Н., Савастенко А.А., Никишин И.А. Неравномерность крутящего момента ДВС и тяговые качества мобильной машины. Автомобильная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 5-8.

18. Реутов А.А. Анализ крутильных колебаний деталей автомобильной трансмиссии с гидротрансформатором. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 4 (76). – С. 23-34.

10. Putintsev S.V., Kuleshov A.S., Ageev A.G. Evaluation of Mechanical Losses in Modern Piston Engines. Engines Construction. 2013;2(252):15-20.

11. Universal Mechanism. Mechanical System as an Object for Modeling. User's Manual [Internet]. 2020 [cited 2024 Feb 23]. Available from: [http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/02\\_um\\_technical\\_manual.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/02_um_technical_manual.pdf)

12. Iqbal S., Al-Bender F., Ompusunggu A.P., Pluymers B., Desmet W. Modeling and Analysis of Wet Friction Clutch Engagement Dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing. 2015;60-61:420-436.

13. Variable Automatic Transmission Multitronic® 01J. Device and Principle of Operation. Program. 2024 Feb 23.

14. Reutov A.A. Analysis of Torsional Vibrations of Transmission Parts in a Car with a Two-Mass Flywheel of Internal Combustion Engine. Transport Engineering. 2023;05:14-25.

15. Universal Mechanism. Driveline Modeling. User's Manual [Internet]. 2020 [cited 2024 Feb 23]. Available from: [http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/22\\_um\\_driveline.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/22_um_driveline.pdf)

16. Dryga IA, Kostikov OM, Sazonov SN. Methodology for Determining the Main Parameters of Starting an Internal Combustion Engine. In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Part II; Voronezh: 2019. p. 66-72.

17. Devyanin S.N., Savastenko A.A., Nikishin I.A. Irregular Ice Torque and Machines Traction Quality. Automotive Industries. 2010;6:5-8.

18. Reutov A.A. Analysis of Torsional Vibration of the Automobile Transmission Parts with Torque Converter. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2022;4(76):23-34.

### Информация об авторах:

#### Реутов Александр Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Брянского государственного технического университета, Scopus ID: 36704986300, 55930922900, ORCID ID: 0000-0002-1703-6654, ORCID ID: 0000-0003-1117-8536

### Information about the authors:

#### Reutov Alexander Alexeevich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Ground Transport and Technological Complexes" of Bryansk State Technical University, Scopus ID: 36704986300, 55930922900, ORCID ID: 0000-0002-1703-6654, ORCID ID: 0000-0003-1117-8536

**Статья поступила в редакцию 23.04.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 15.05.2024.**

**The article was submitted 23.04.2024; approved after reviewing 06.05.2024; accepted for publication 15.05.2024.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 519.86

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-53-64

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ ОБЛИГАЦИЙ, ЗАВИСЯЩИХ ОТ ВРЕМЕНИ И СЛУЧАЙНЫХ СОСТОЯНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Оливер Джидзем Фока<sup>1✉</sup>, Олег Николаевич Дмитроченко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> foka.russia.maths1@mail.ru

<sup>2</sup> dmitroleg@rambler.ru

**Аннотация.** В задаче оптимального стохастического управления мы оцениваем, с помощью метода безразличия полезности, цену облигации и премию своп-контракта по дефолту (КДС), когда параметры модели (рыночная процентная ставка, коэффициент дрейфа и волатильность рискованных базовых активов) являются случайными функциями времени и состояния. А именно, процентная ставка безрискового актива зависит от времени, цены рискованных активов описываются линейными однородными стохастическими дифференциальными уравнениями (СДУ) с мультипликативным шумом. Для этого мы рассматриваем портфель с безрисковым активом и рискованным активом без риска дефолта. Мы определяем для каждого такого портфеля количество рискованных активов, максимизирующее ожидаемую полезность его конечного богатства. Это количество позволяет нам решить параболические дифференциальные уравнения в частных производных, возникающие из уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана (ГЯБ), путем преобразования их в обыкновенные дифференциальные уравнения с помощью метода разделения переменных, чтобы получить функцию мгновенной стоимости каждого портфеля. Мы выводим цену облигации и ставку премии своп-контракта по дефолту (КДС), которые являются суммами, обеспечивающими тот же уровень ожидаемой полезности, инвестируя все свое богатство в портфель, не содержащий этих кредитных инструментов, или инвестируя эти суммы в кредитные инструменты и оставшуюся часть своего богатства в портфель.

**Ключевые слова:** стохастический процесс, оптимальное управление, динамическое программирование

**Для цитирования:** Фока О.Д., Дмитроченко О.Н. Задача оптимального стохастического управления и оценки стоимости корпоративных облигаций, зависящих от времени и случайных состояний параметров // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 53-64. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-53-64.

Original article

Open Access Article

## THE PROBLEM OF OPTIMAL STOCHASTIC CONTROL AND CORPORATE BOND VALUATION, DEPENDING ON TIME AND RANDOM STATES OF PARAMETERS

Oliver D. Foka<sup>1✉</sup>, Oleg N. Dmitrochenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> foka.russia.maths1@mail.ru

<sup>2</sup> dmitroleg@rambler.ru

**Abstract.** In the optimal stochastic control problem, one estimates, using the utility indifference method, the bond price and the premium of a default swap contract (Credit default swap) when the model parameters (market interest rate, drift coefficient, and volatility of risky underlying assets) are random functions of time and state. Namely, the interest rate of the risk-free asset depends on time, and the prices of risky assets are described by linear homogeneous stochastic differential equations (SDEs) with multiplicative noise. To do this, the authors consider a portfolio with a risk-free asset and a risky asset with no default risk. For each such portfolio, the authors determine the amount of risky assets that maximizes the expected utility of its final wealth. This quantity allows one to solve the parabolic partial differential equations arising from the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation by transforming them into ordinary differential equations using the method of variable separation to obtain the instantaneous value function of each portfolio. The authors derive the bond price and the default swap-contract premium (CDS) rate, which are the amounts that provide the same level of the expected utility by investing all of one's wealth in a portfolio that does not contain these credit instruments, or by investing these amounts in credit instruments and the remainder of one's wealth in the portfolio.

**Keywords:** stochastic process, optimal control, dynamic programming

**For citation:** Foka O.D., Dmitrochenko O.N. The Problem of Optimal Stochastic Control and Corporate Bond Valuation, Depending on Time and Random States of Parameters. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 53-64. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-53-64.

## Введение

Торговля осуществляется между банковским счетом и акционным счетом, при этом цена акций моделируется как процесс диффузии. Основное предположение состоит в том, что коэффициенты последнего зависят от времени и стохастического состояния процесса. В классической модели динамического выбора портфеля Р. Мертона предполагается, что доходности и волатильности рискованных активов являются константами или детерминистическими функциями. Однако многие явления, такие как смайлы волатильности и другие, не могут быть объяснены в рамках моделей с постоянной волатильностью. В литературе существует много работ, которые анализируют стохастическую волатильность в различных финансовых моделях.

Например, В. Хендерсон и Д. Хобсон [5] изучают цены опционов в рамках различных мартингаловых мер. Важным классом моделей является класс моделей, связанных с максимизацией полезности. В таких моделях цель состоит в максимизации полезности богатства (накопительного или терминального). Много статей было посвящено изучению этой проблемы в стохастической среде. С целью нахождения оптимального портфеля путем максимизации ожидаемых функций полезности для терминального богатства в стохастической волатильной среде, Т. Зарифопулу [2] представляет упрощенные решения и выражает функцию стоимости через решение линейного параболического уравнения.

Благодаря работе Р. Мертона [3] в 1969 году по проблемам инвестирования, связанным с проблемами С. Ходжеса [6] в 1989 году, относящимися к двум сценариям этих проблем, Ж. Сиглох [4] в 2009 году в своей диссертации оценил безразличную цену облигации и безразличную премию КДС, предполагая, что параметры модели (процентная ставка, коэффициент сноса и волатильность) являются постоянными. Мы используем коэффициенты, которые зависят от времени и стохастического состояния процесса для оценки безразличной цены облигации и безразличной премии КДС с целью обобщения работ Ж. Сиглоха.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

*I. Постановка модели.* Рассмотрим инвестора, который в момент времени  $t$  имеет самофинансируемый портфель с  $Q_t^0$  безрисковыми активами стоимостью  $M_t$ , подверженными процентной ставке  $r_t$ , и  $Q_t^1, Q_t^2, \dots, Q_t^n$  бездефолтными рискованными активами со стоимостями  $A_b^1, A_b^2, \dots, A_b^n$  соответственно. Динамика этих активов описывается следующим образом:

$$\forall t \in [0, T], dM_t = r_t M_t dt \text{ (динамика безрисковых активов);}$$

$$\forall t \in [0, T], \forall i \in \{1, \dots, n\}, dA_t^i = A_t^i (\mu_t^i dt + \sigma_t^i dB_t^i) \text{ (динамика рискованных активов),}$$

где  $\mu_t^i$  и  $\sigma_t^i$  – коэффициенты сноса и диффузии соответственно.

Заметим, что  $dB_t^i dB_t^j = \rho_{ij} dt$ , где  $\rho_{ij}$  – коэффициент корреляции между  $B_t^i$  и  $B_t^j$ . В дальнейшем будем считать  $B_t^i$  и  $B_t^j$  сильно коррелированными и полагать  $\rho_{ij} = 1$ .

В любой момент времени  $t$  разумно предположить, что инвестор имеет полную информацию о ценах рискованных активов  $A_s^1, \dots, A_s^n$  для  $0 \leq s \leq t$ . Мы моделируем информационное состояние инвестора с помощью фильтрации  $(\mathcal{F}_t)_{t \in [0, T]}$ , где  $\mathcal{F}_t = \sigma(\{B_s^1, \dots, B_s^n: 0 \leq s \leq t\} \cup \mathcal{N})$  где  $\mathcal{N}$  – множество подмножеств  $\Omega$  нулевой меры, фильтрация  $(\mathcal{F}_t)$  удовлетворяет обычным условиям: она правосторонне непрерывна и увеличивается.  $\mathcal{F}_0$  содержит все множества нулевой меры, а  $\mathcal{F}_T$  представляет собой всю доступную информацию на  $[0, T]$ .

В момент времени  $t$  богатство инвестора в безрисковом активе равно  $\pi_0 = \pi_0(t) = Q_t^0 M_t$ , в  $i$ -м рисковом активе равно  $\pi_i = \pi_i(t) = Q_t^i A_t^i$ , а общее богатство  $\Lambda_t$  инвестора составляет:

$$\Lambda_t = \pi_0(t) + \sum_{i=1}^n \pi_i(t). \quad (1)$$

Динамика процесса богатства задается стохастическим дифференциальным уравнением:

$$d\Lambda_t = [r_t \Lambda_t + \pi(t)^T (\mu_t - \mathbf{r}_t)] dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \sigma_t^i dB_t^i. \quad (2)$$

*Доказательство.* Поскольку портфель является самофинансируемым, дифференциал благосостояния  $\Lambda_t$ , определенный в (2), дает:

$$\begin{aligned} d\Lambda_t &= Q_t^0 dM_t + \sum_{i=1}^n Q_t^i dA_t^i = Q_t^0 r_t M_t dt + \sum_{i=1}^n Q_t^i A_t^i [\mu_t^i dt + \sigma_t^i dB_t^i] = \\ &= \pi_0(t) r_t dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \mu_t^i dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \sigma_t^i dB_t^i, \end{aligned}$$

поскольку  $\pi_0(t) = \Lambda_t - \sum_{i=1}^n \pi_i(t)$ , тогда:

$$\begin{aligned} d\Lambda_t &= (\Lambda_t - \sum_{i=1}^n \pi_i(t)) r_t dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \mu_t^i dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \sigma_t^i dB_t^i = \\ &= r_t \Lambda_t dt - \sum_{i=1}^n \pi_i(t) r_t dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \mu_t^i dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \sigma_t^i dB_t^i. \end{aligned}$$

Тогда, мы получаем:

$$d\Lambda_t = [r_t \Lambda_t + \pi(t)^T (\mu_t - \mathbf{r}_t)] dt + \sum_{i=1}^n \pi_i(t) \sigma_t^i dB_t^i.$$

Мы примем следующие обозначения:  $\mathbf{r}_t = (r_t, \dots, r_t)^T \in R^n$  – вектор процентной ставки,  $\pi = \pi(t) = (\pi_1(t), \dots, \pi_n(t))^T \in R^n$  – вектор богатства портфель рискованных активов инвестор,  $\Sigma_t = (\sigma_t^i \sigma_t^j)_{1 \leq i, j \leq n}$  – (симметричная и невырожденная) ковариационная матрица рискованных активов,  $\mu_t = (\mu_t^1, \dots, \mu_t^n)^T \in R^n$  – вектор коэффициента дрейфа рискованных активов,  $\mathcal{A}_s$  – набор подходящих стратегий портфеля без дефолтов.

**Определение.** Процесс  $\pi(t) = (\pi_1(t), \dots, \pi_n(t))^T$ ,  $\mathcal{F}_t$  – адаптированный – допустимая стратегия портфеля, если  $E \left( \int_0^T \pi^2(t) dt \right) < +\infty$ .

**Замечание.** Функция ценности оптимизационной задачи задается:

$$\Psi(t, \lambda) = \sup_{\pi \in R^n} E[u(\Lambda_T) | \Lambda_t = \lambda] \quad (3)$$

и удовлетворяет уравнению в частных дифференциалах (известному как уравнение в частных дифференциалах ГЯБ):

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial t}(t, \lambda) + \sup_{\pi \in R^n} \mathcal{G}^\pi \Psi(t, \lambda) = 0; \\ \Psi(T, \lambda) = u(\lambda), \quad \lambda \in R, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\mathcal{G}^\pi \Psi(t, \lambda) = r_t \lambda \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda}(t, \lambda) + \frac{1}{2} \pi(t)^T \Sigma_t \pi(t) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \lambda^2}(t, \lambda) + \pi(t)^T (\mu_t - \mathbf{r}_t) \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda}(t, \lambda)$  – бесконечно малый генератор;  $\Lambda_T$  – конечное богатство;  $u$  – функция полезности *CARA* (Constant Absolute Risk Aversion), которая является вогнутой и неубывающей:

$$u(x) = -e^{-\gamma x}, \quad \gamma > 0 \quad (5)$$

где  $\gamma$  – коэффициент склонности к риску.

Представление функции стоимости в разделяемой форме  $\Psi(t, \lambda) = u(\lambda)g(t)$  позволяет выделить функцию  $g$ , которая обычно неизвестна и удовлетворяет уравнению обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ), с  $g: [0, T] \rightarrow R_+^*$  – производная функция на  $[0, T]$  и проверяющая  $g(T) = 1$ .

**Теорема 1.**

а) решение уравнения в частных производных (4) задается выражением:

$$\Psi(t, \lambda) = -e^{-\gamma\lambda + \int_t^T \beta_s ds} \quad (6)$$

где  $\beta_t = r_t\lambda - \frac{1}{2}(\mu_t - r_t)^T \Sigma_t^{-1}(\mu_t - r_t)$ .

б) оптимальный портфель в частных производных (4) задается выражением:

$$\pi^*(t) = -\frac{1}{\gamma} \Sigma_t^{-1}(\mu_t - r_t). \quad (7)$$

*Доказательство.* Критическая точка  $\mathcal{G}^{\pi\Psi}$  через условие оптимальности первого порядка задается:

$$\pi^*(t) = -\frac{\frac{\partial \Psi}{\partial \lambda}(t, \lambda)}{\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \lambda^2}(t, \lambda)} \Sigma_t^{-1}(\mu_t - r_t) = -\frac{1}{\gamma} \Sigma_t^{-1}(\mu_t - r_t).$$

Подставляя  $\pi^*(t)$  в уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана (4), получаем:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t}(t, \lambda) + r_t \lambda \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda}(t, \lambda) - \frac{1}{2}(\mu_t - r_t)^T \Sigma_t^{-1}(\mu_t - r_t) \frac{(\frac{\partial \Psi}{\partial \lambda}(t, \lambda))^2}{\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \lambda^2}(t, \lambda)} = 0.$$

Поскольку  $\Psi(t, \lambda) = -e^{-\gamma\lambda}g(t)$ , то  $g$  удовлетворяет следующему обыкновенному дифференциальному уравнению:

$$-e^{-\gamma\lambda} \left[ g'(t) + \left( r_t \lambda - \frac{1}{2}(\mu_t - r_t)^T \Sigma_t^{-1}(\mu_t - r_t) \right) g(t) \right] = 0.$$

Заменяя  $\beta_t$  его значением, получаем:

$$g'(t) + \beta_t g(t) = 0$$

Используя условие  $g(T) = 1$ , имеем:  $g(t) = e^{\int_t^T \beta_s ds}$ . Кроме того, поскольку  $\Psi(t, \lambda) = -e^{-\gamma\lambda}g(t)$ , отсюда и следует результат.

**Замечание.** Функция значения  $\Psi$  является вогнутой и неубывающей по отношению к переменной богатства  $\lambda$  благодаря ее тесной зависимости от функции полезности  $u$ .

II. *Цены кредитных инструментов в безрисковом портфеле.* В течение периода инвестирования агент может инвестировать часть своего богатства в корпоративные облигации  $C_t$  или кредитный дефолтный своп (КДС), а остальное – в портфель, состоящий из безрисковых активов стоимостью  $M_t$  и рискового актива стоимостью  $I_t$  с динамикой:

$$\forall t \geq 0, dI_t = I_t[\mu_t^1 dt + \sigma_t^1 dB_t^1],$$

где  $B_t^1$  – стандартное броуновское движение.

Целью этого раздела является определение цены каждого из этих двух кредитных инструментов методом оценки на основе безразличия полезности. Отметим, что модель оценки



дефолта субъекта отсылки – это модель в сокращенной форме которой моделируется пуассоновским процессом  $(N_t)_{t \geq 0}$  с  $N_0 = 0$  и постоянной интенсивностью  $\kappa$ , а время наступления дефолта обозначается  $\tau_d$  и определяется как:

$$\tau_d = \inf \{t \geq 0 | N_{\{t\}} = 1 \}.$$

Построим этот раздел, оценивая методом равнодушия полезности цену корпоративной облигации  $C_t$  для портфеля с безрисковыми активами и рисковыми активами без дефолта. Допустим, что эта цена обеспечивает инвестору тот же уровень ожидаемой полезности, что и вложение остатка его состояния  $\lambda - C_t$  в безрисковые активы  $M_t$  и рисковые активы  $I_t$ , или вложение всего своего состояния  $\lambda$  в эти же активы. Покупая корпоративную облигацию, инвестор получает номинальную сумму  $F$  в случае, если обслуживаемое лицо не дефолтирует до срока погашения  $T$ , или получает процент  $R$  (предполагается, что является случайной величиной, независимой на интервале  $(0,1)$  движения Броуновского  $B_t$ ) от номинальной суммы в случае дефолта до срока погашения.

Поскольку для будущих денежных потоков эквивалентность уверенности [4, 8] является суммой, которую мы были бы готовы получить без риска относительно ожидаемых будущих денежных потоков, чистая приведенная стоимость инвестиции может быть определена, как сумма эквивалентов определенных денежных потоков, дисконтированных по безрисковой ставке. Уверенность эквивалента  $R$  удовлетворяет уравнению:  $E \left[ u \left( R F e^{\int_t^T r_s ds} \right) \right] = u \left( \widetilde{R}_t F e^{\int_t^T r_s ds} \right)$  в [4] и определяется следующим образом:

$$\widetilde{R}_t = - \frac{1}{\gamma F e^{\int_t^T r_s ds}} \ln E \left[ e^{-\gamma R F e^{\int_t^T r_s ds}} \right].$$

Динамика благосостояния инвестора с условным требованием определяется следующим образом:

$$\begin{cases} d\bar{\Lambda}_s = [r_s \bar{\Lambda}_s + \bar{\pi}_1(s)(\mu_s^1 - r_s)] ds + \bar{\pi}_1(s) \sigma_s^1 dB_s, \\ \bar{\Lambda}_\tau = \bar{\Lambda}_{\tau^-} + R F \cdot \mathbf{1}_{\{\tau \leq T\}} + F \cdot \mathbf{1}_{\{\tau > T\}} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $\tau = \min(\tau_d, T)$  и ограничение богатства означает, что если дефолт ссылочного лица происходит до погашения ( $\tau \leq T$ ), то инвестор получает случайный процент  $R$  от номинала, а в противном случае ( $\tau > T$ ) он получает весь номинал.

Любая допустимая стратегия характеризуется  $\bar{\pi}_1(t)$ , которая представляет собой сумму денег, инвестированных в  $I_t$  в момент времени  $t$ . Для удобства в дальнейшем мы будем писать  $\bar{\pi}(t)$  вместо  $\bar{\pi}_1(t)$ .

Функция стоимости инвестора для портфеля с условной требовательностью определяется как:

$$\bar{\Psi}(t, \lambda) = \sup_{\bar{\pi} \in R} E[u(\bar{\Lambda}_\tau) | \bar{\Lambda}_t = \lambda, t < \tau_d]. \quad (9)$$

Следующее предложение устанавливает УЧП, проверяемое  $\bar{\Psi}$ .

**Предложение 1.** Функция удовлетворяет:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t}(t, \lambda) + \sup_{\bar{\pi} \in R} \mathcal{G}^{\bar{\pi}} \bar{\Psi}(t, \lambda) = 0 \\ \bar{\Psi}(T, \lambda) = u(\lambda + F), \quad \lambda \in R \end{cases} \quad (10)$$

где  $\mathcal{G}^{\bar{\pi}} \bar{\Psi}(t, \lambda) = r_t \lambda \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(t, \lambda) + \frac{1}{2} (\sigma_t^1)^2 \bar{\pi}^2(t) \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \lambda^2}(t, \lambda) + (\mu_t^1 - r_t) \bar{\pi}(t) \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(t, \lambda) + \kappa [\Psi(t, \lambda + \widetilde{R}_t F, z) - \bar{\Psi}(t, \lambda, z)]$ ,

где  $\bar{\Psi}$  – функция ценности, соответствующая инвестированию в портфель с безрисковым активом  $M_t$  и рисковым активом  $I_t$ .

В доказательстве этого результата пишем  $\bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}}$  вместо  $\bar{\Lambda}_t$ , чтобы подчеркнуть зависимость богатства инвестора от стратегии  $\bar{\pi}$ .

*Доказательство.*  $\bar{\Psi}(t, \bar{\Lambda}_t)$  является преобразованием процесса  $(\bar{\Lambda}_t)_{t \in [0, T]}$ ,  $\bar{\pi}^*$  – оптимальное управление в (9),  $\bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*}$  – состояние системы, являющееся решением (8), начинающимся с  $\lambda$  в момент  $t$  при управлении  $\bar{\pi}^*$ . Поскольку дефолт на референсном объекте (облигации) вызывается пуассоновским процессом  $(N_t)_{t \geq 0}$ , то, применяя формулу Ито между  $t$  и  $t + h$ , получаем:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}(t+h, \bar{\Lambda}_{t+h}^{\bar{\pi}^*}) &= \bar{\Psi}(t, \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*}) + \int_t^{t+h} \left( \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) + \left[ r_s \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*} + (\mu_s^1 - r_s) \bar{\pi}^*(s) \right] \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) \right) ds + \\ &+ \int_t^{t+h} \frac{1}{2} (\sigma_s^1)^2 (\bar{\pi}^*(s))^2 \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \lambda^2}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) ds + \int_t^{t+h} \sigma_s^1 \bar{\pi}^*(s) \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) dB_s^1 + \int_t^{t+h} \left[ \Psi(s, \Lambda_s^{\bar{\pi}^*} + \right. \\ &\left. + \bar{R}_s F) - \bar{\Psi}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) \right] dN_s. \end{aligned}$$

Действительно, когда в момент погашения облигации происходит дефолт, инвестор получает процент  $\bar{R}_t$  от номинала, составляющий  $\bar{R}_t F$ , и следовательно, новый процесс богатства равен  $\lambda + \bar{R}_t F$ ; в то время как, если дефолта по облигации не происходит,  $\bar{R}_t = R = 1$ , и следовательно, новый процесс богатства равен  $\lambda + F$ .

Используя условное математическое ожидание, мы имеем:

$$\begin{aligned} E \left[ \bar{\Psi}(t+h, \bar{\Lambda}_{t+h}^{\bar{\pi}^*}) \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] &= \bar{\Psi}(t, \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*}) + E \left[ \int_t^{t+h} \left( \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) + r_s \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) \right) ds \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] + \\ &+ E \left[ \int_t^{t+h} \left( \frac{1}{2} (\sigma_s^1)^2 (\bar{\pi}^*(s))^2 \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \lambda^2}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) + (\mu_s^1 - r_s) \bar{\pi}^*(s) \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) \right) ds \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] + \\ &+ E \left[ \int_t^{t+h} \left[ \Psi(s, \Lambda_s^{\bar{\pi}^*} + \bar{R}_s F) - \bar{\Psi}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) \right] dN_s \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right]. \end{aligned}$$

При этом:

$$E \left[ \int_t^{t+h} \sigma_s^1 \bar{\pi}^*(s) \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) dB_s^1 \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] = 0.$$

Кроме того,

$$\bar{\Psi}(t, \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*}) = E \left[ \bar{\Psi}(t+h, \bar{\Lambda}_{t+h}^{\bar{\pi}^*}) \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right],$$

Так:

$$\begin{aligned} &E \left[ \int_t^{t+h} \left( \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) + r_s \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \lambda) \right) ds \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] + \\ &+ E \left[ \int_t^{t+h} \left( \frac{1}{2} (\sigma_s^1)^2 (\bar{\pi}^*(s))^2 \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \lambda^2}(s, \lambda) + (\mu_s^1 - r_s) \bar{\pi}^*(s) \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda}(s, \lambda) \right) ds \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] + \\ &+ E \left[ \int_t^{t+h} \left[ \Psi(s, \Lambda_s^{\bar{\pi}^*} + \bar{R}_s F) - \bar{\Psi}(s, \bar{\Lambda}_s^{\bar{\pi}^*}) \right] dN_s \mid \bar{\Lambda}_t^{\bar{\pi}^*} = \lambda \right] = 0. \end{aligned}$$

И поскольку  $\sup_{\bar{\pi} \in R} \mathcal{G}^{\bar{\pi}} \bar{\Psi}(t, \lambda) = \mathcal{G}^{\bar{\pi}^*} \bar{\Psi}(t, \lambda)$ , то, разделив на  $h$  и переходя к пределу при  $h \rightarrow 0$ , мы получаем искомый результат.

Завершим этот раздел, оценив с использованием метода индифферентности полезности цену корпоративной облигации для портфеля с безрисковым рискованным активом. Для этого напомним определение этой цены в соответствии с этим методом, которое утверждает, что это цена, обеспечивающая инвестору тот же ожидаемый уровень полезности, когда он инвестирует оставшуюся часть своего богатства  $\lambda - C_t$  в безрисковый актив  $M_t$  и рискованный актив  $I_t$ , или когда он инвестирует все свое богатство  $\lambda$  в безрисковый актив  $M_t$  и рискованный актив  $I_t$ .

**Определение.** Цена безразличия  $C_t$  облигации является решением уравнения  $\bar{\Psi}(t, \lambda - C_t) = \Psi(t, \lambda)$ , для  $n = 1$ .

Чтобы определить  $\Psi = \bar{\Psi}$ , мы предполагаем, что функция стоимости  $\bar{\Psi}$  записывается в виде  $\forall t \in [0, T], \bar{\Psi}(t, \lambda) = -e^{-\gamma \lambda} \bar{h}(t)$ , где  $\bar{h}: [0, T] \rightarrow R_+^*$  является функцией такой, что  $\bar{h}(T) = e^{-\gamma F}$ .

Первый основной результат этой работы оценивает цену облигации.

### Теорема 2.

Цена безразличия  $C_t$  облигации определяется уравнением:

$$C_t = \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{g(t)}{\bar{h}(t)} \right), \quad (11)$$

где

$$g(t) = e^{\int_t^T \beta_s ds}; \quad (12)$$

$$\bar{h}(t) = e^{-\gamma F} e^{-\int_t^T \alpha_s ds} - e^{-\int_t^T \alpha_s ds} \int_t^T \kappa e^{-\bar{R}_s F} e^{\int_s^T (\alpha_u + \beta_u) du} ds; \quad (13)$$

$$\beta_t = r_t \lambda - \frac{1}{2} (\mu_t - r_t)^T \Sigma_t^{-1} (\mu_t - r_t); \quad (14)$$

$$\alpha_t = \frac{(\gamma - 2)(\mu_t^1 - r_t)}{2(\sigma_t^1)^2} - (\lambda \gamma r_t + \kappa). \quad (15)$$

*Доказательство.* Заменяя  $\bar{\Psi}$  его выражением в уравнении (10), получаем:

$$\begin{cases} \bar{h}'(t) - (\gamma \lambda r_t + \kappa) \bar{h}(t) + \inf_{\bar{\pi}_1(t) \in R} - \left( (\mu_t^1 - r_t) \gamma \bar{\pi}_1(t) - \frac{1}{2} (\sigma_t^1)^2 \bar{\pi}_1^2(t) \gamma^2 \right) \bar{h}(t) = -\kappa e^{-\gamma \bar{R}_t F} g(t) \\ \bar{h}(T) = e^{-\gamma F} \end{cases}. \quad (16)$$

По условию оптимальности первого порядка минимум достигается при:

$$\bar{\pi}_1^*(t) = \frac{(\mu_t^1 - r_t)}{\gamma (\sigma_t^1)^2}.$$

И из уравнения (16) теперь можем получить:

$$\inf_{\bar{\pi}_1(t) \in R} - \left( (\mu_t^1 - r_t) \gamma \bar{\pi}_1(t) - \frac{1}{2} (\sigma_t^1)^2 \bar{\pi}_1^2(t) \gamma^2 \right) \bar{h}(t) = \frac{(2 - \gamma)(\mu_t^1 - r_t)}{2(\sigma_t^1)^2} \bar{h}(t).$$

Тогда получается следующее линейное обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\begin{cases} \bar{h}'(t) + \left[ \frac{(\gamma - 2)(\mu_t^1 - r_t)}{2(\sigma_t^1)^2} - (\lambda \gamma r_t + \kappa) \right] \bar{h}(t) = -\kappa e^{-\gamma \bar{R}_t F} g(t) \\ \bar{h}(T) = e^{-\gamma F} \end{cases}.$$

Итак, зададим:

$$\alpha_t = \frac{(\gamma - 2)(\mu_t^1 - r_t)}{2(\sigma_t^1)^2} - (\lambda\gamma r_t + \kappa).$$

Что приводит к:  $\bar{h}'(t) + \alpha_t \bar{h}(t) = -\kappa e^{-\gamma \bar{R}_t F} g(t)$ . Чья резолюция дает  $e^{-\gamma F} e^{-\int_t^T \alpha_s ds}$ . Цена безразличия  $p$  облигации определяется уравнением:

$$\bar{\Psi}(t, \lambda - C_t) = \Psi(t, \lambda).$$

Имеем:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}(t, \lambda - C_t) = \Psi(t, \lambda) &\Rightarrow -e^{-\gamma(\lambda - C_t)} \bar{h}(t) = -e^{-\gamma\lambda} g(t), \quad \text{т.е.} \\ -e^{-\gamma(\lambda - C_t)} \bar{h}(t) = -e^{-\gamma\lambda} g(t) &\Rightarrow \gamma C_t = \ln\left(\frac{g(t)}{\bar{h}(t)}\right). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$C_t = \frac{1}{\gamma} \ln\left(\frac{g(t)}{\bar{h}(t)}\right).$$

В следующем разделе можем оценить непрерывную стоимость премии по КДС, которую инвестор платит продавцу защиты.

Предположим, что инвестор продает (или покупает) кредитный дефолтный своп (КДС) и получает (или платит) непрерывную премиальную ставку  $S(t)$ , выплачиваемую на номинальную сумму  $F$  с момента заключения контракта до наступления срока погашения или до момента дефолта ссыльного субъекта, в зависимости от того, что произойдет раньше. Если дефолт наступает до погашения, инвестор совершает (или получает) случайный платеж  $(1 - R)F$  (где  $0 \leq R \leq 1$ ), и все будущие премиальные платежи прекращаются.

Аналогично (2) и (8), динамика богатства инвестора имеет вид:

$$d\tilde{\Lambda}_t = \begin{cases} [r_t \tilde{\Lambda}_t + \epsilon S(t)F + (\mu_t^1 - r_t) \tilde{\pi}_1(t)] dt + \tilde{\pi}_1(t) \sigma_t^1 dB_t^1, & 0 < t < \tau, \\ [r_t \tilde{\Lambda}_t + (\mu_t^1 - r_t) \tilde{\pi}_1(t)] dt + \tilde{\pi}_1(t) \sigma_t^1 dB_t^1, & t > \tau, \end{cases} \quad (17)$$

где предельное богатство:  $\tilde{\Lambda}_\tau = \tilde{\Lambda}_{\tau^-} - (1 - R)F \cdot I_{\{\tau_d \leq \tau\}}$ . Здесь  $\epsilon = +1$  для продавца КДС и  $\epsilon = -1$  для покупателя.

Аналогично (9) и (10), функция стоимости  $\tilde{\Psi}(t, \lambda)$ , соответствующая инвестициям в КДС, определяется как:

$$\tilde{\Psi}(t, \lambda) = \sup_{\tilde{\pi} \in R} E[u(\tilde{\Lambda}_T) | \tilde{\Lambda}_{t_t} = \lambda, t < \tau_d]. \quad (18)$$

Следующее предложение устанавливает УЧП, проверяемое  $\tilde{\Psi}$ .

**Предложение 2.** Функция  $\tilde{\Psi}$  удовлетворяет:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial t}(t, \lambda) + \sup_{\tilde{\pi} \in R} \mathcal{G}_\epsilon^{\tilde{\pi}} \tilde{\Psi}(t, \lambda) = 0 \\ \tilde{\Psi}(T, \lambda) = u(\lambda), \quad \lambda \in R \end{cases}, \quad (19)$$

где  $\mathcal{G}_\epsilon^{\tilde{\pi}} \tilde{\Psi}(t, \lambda) = r_t \lambda \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \lambda}(t, \lambda) + \frac{1}{2} (\sigma_t^1)^2 \tilde{\pi}^2(t) \frac{\partial^2 \tilde{\Psi}}{\partial \lambda^2}(t, \lambda) + [(\mu_t^1 - r_t + \epsilon S(t)F)] \tilde{\pi}(t) \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \lambda}(t, \lambda) + \kappa [\Psi(t, \lambda - \epsilon(1 - \bar{R}_t)F, z) - \tilde{\Psi}(t, \lambda, z)]$ .

*Доказательство.* Действуем аналогично, как в предложении 2. Достаточно заменить  $\lambda + \bar{R}_t F$  на  $\lambda - \epsilon(1 - \bar{R}_t)F$  и  $\bar{\Psi}$  на  $\tilde{\Psi}$ , и мы получаем результат.

Предположим, что функция стоимости  $\tilde{\Psi}$  записывается в виде:

$$\forall t \in [0, T], \tilde{\Psi}(t, \lambda) = -e^{-\gamma\lambda} \tilde{h}(t),$$

где  $\tilde{h}: [0, T] \rightarrow R_+^*$  – функция, удовлетворяющая условию  $\tilde{h}(T) = 1$ .

Второй основной результат этой работы дает формулу для расчета ставки кредитного дефолтного свопа.

### Теорема 3.

Ставка премии безразличия  $S(t)$  кредитного дефолтного свопа является решением уравнения:  $\tilde{\Psi}(t, \lambda) = \Psi(t, \lambda)$  и это эквивалентно следующему уравнению:  $\tilde{h}(t) = g(t)$ , где:

$$g(t) = e^{\int_t^T \beta_s ds}; \quad (20)$$

$$\tilde{h}(t) = e^{-\gamma F} e^{-\int_t^T \alpha_s ds} - e^{-\int_t^T \alpha_s ds} \int_t^T \kappa e^{\epsilon(1-\tilde{R}_s)F} e^{\int_s^T (\alpha_u + \beta_u) du} ds; \quad (21)$$

$$\beta_t = r_t \lambda - \frac{1}{2} (\mu_t - r_t)^T \Sigma_t^{-1} (\mu_t - r_t); \quad (22)$$

$$\alpha_t = \frac{(\gamma-2)(\mu_t^1 - r_t + \epsilon S(t)F)}{2(\sigma_t^1)^2} - (\lambda \gamma r_t + \kappa). \quad (23)$$

*Доказательство.* Оно основано по аналогии с теоремой 2. Достаточно заменить  $\lambda + \tilde{R}_t F$  на  $\lambda - \epsilon(1 - \tilde{R}_t)F$ , и результат получается автоматически.

## Результаты

Ниже представлены траектории рискового актива с зависящими от времени и состояния дрейфом и волатильностью случайной функции оптимального управления.

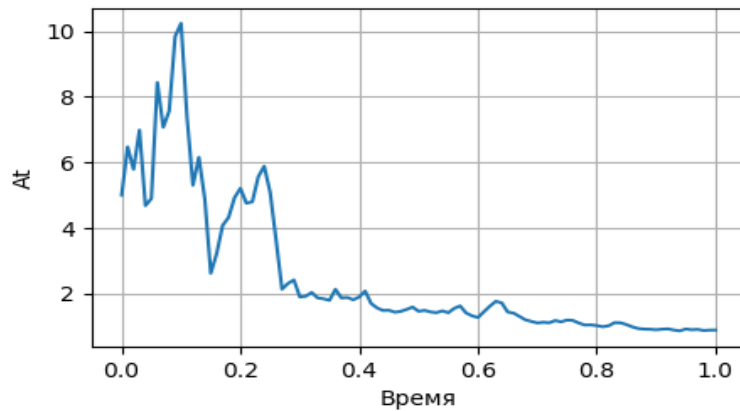


Рис. 1. Траектории рискового актива для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$   
 Fig. 1. Trajectory of risky asset for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$

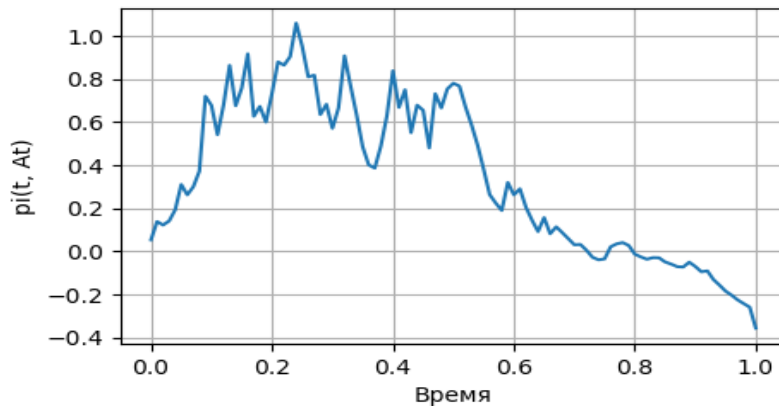


Рис. 2. Функции оптимального управления для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$   
 Fig. 2. Optimal control function for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$

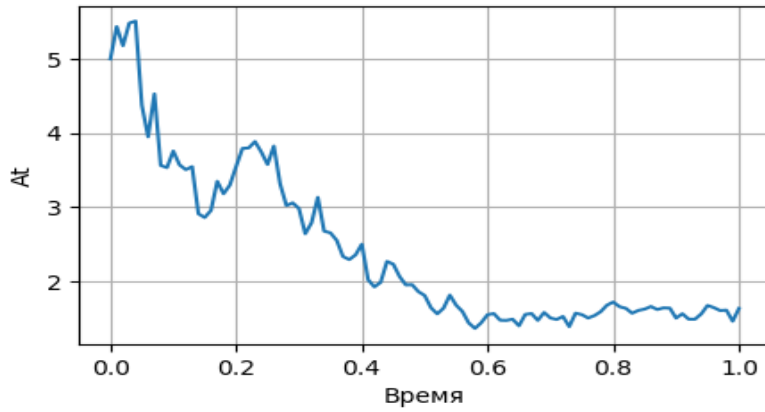


Рис. 3. Траектории рискованного актива для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$   
 Fig. 3. Trajectory of risky asset for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$

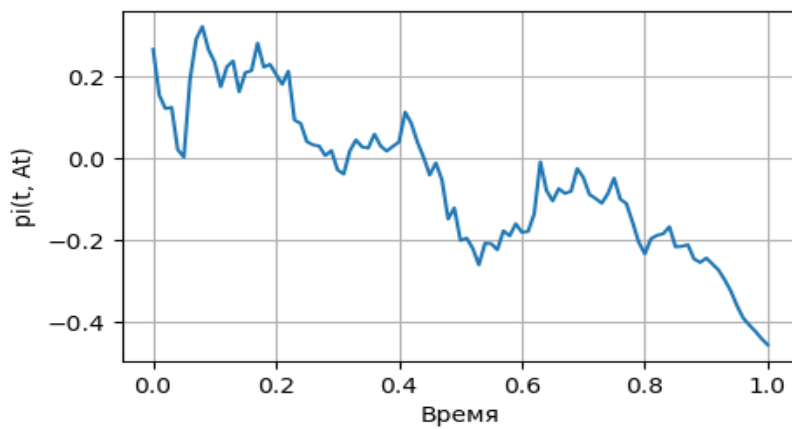


Рис. 4. Функции оптимального управления для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$   
 Fig. 4. Optimal control function for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$

Мы представляем богатство портфеля инвестора в каждый момент времени  $t$ , значения которого зависят от вариации цен рискованных и нерискованных активов с непостоянными параметрами.

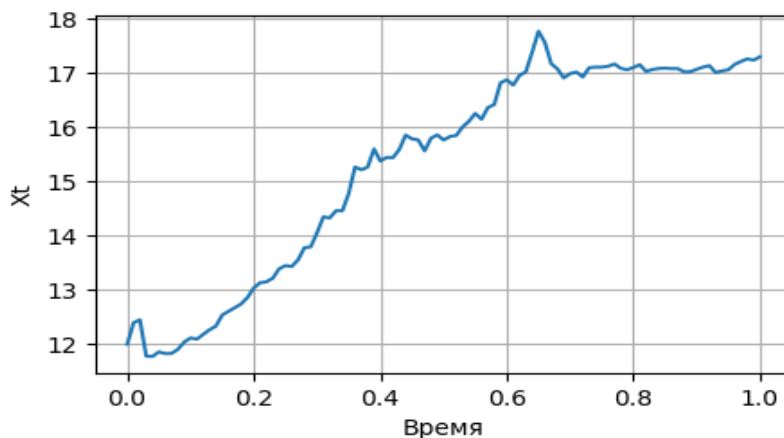


Рис. 5. Богатство портфеля инвестора для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$   
 Fig. 5. Wealth portfolio of investor for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$



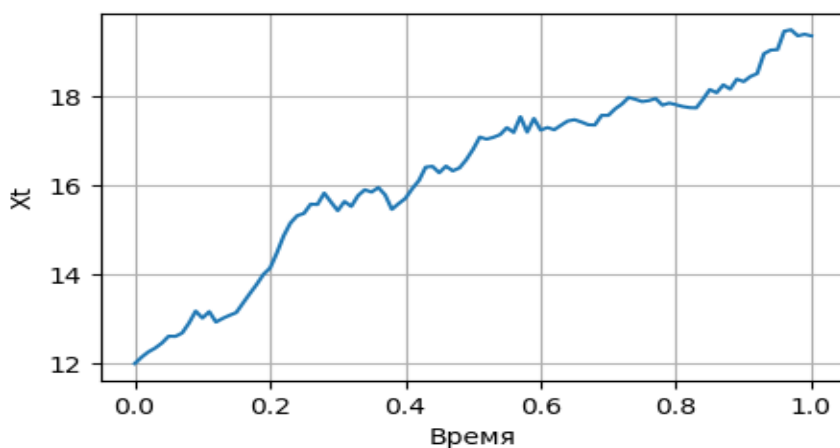


Рис. 6. Богатство портфеля инвестора для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$   
 Fig. 6. Wealth portfolio of investor for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$

Мы представили выше цену безразличия корпоративной облигации, зависящую от базового актива с непостоянным коэффициентом.

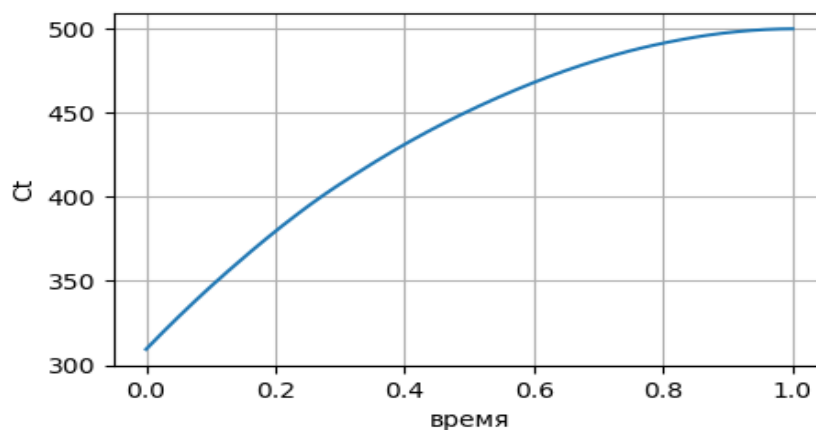


Рис. 7. Контингентное требование для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$   
 Fig. 7. Contingent claim for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma A_t$

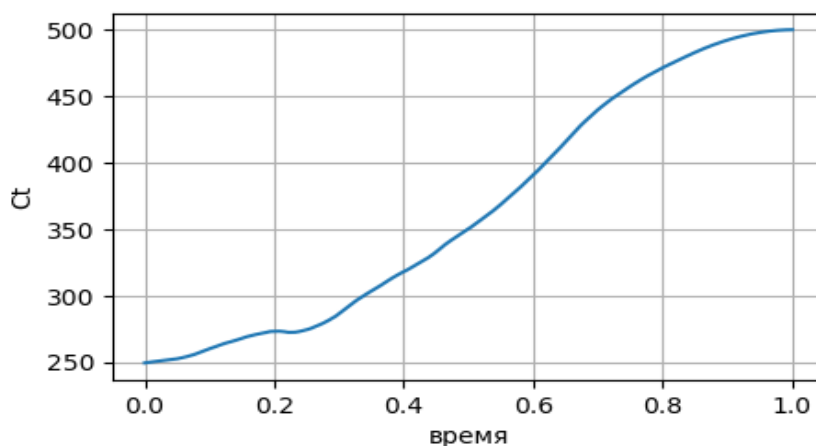


Рис. 8. Контингентное требование для  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$   
 Fig. 8. Contingent claim for  $\mu(t, A_t) = \mu A_t$ ;  $\sigma(t, A_t) = \sigma\sqrt{A_t}$

### Заключение

В данной работе рассмотрена оценка безразличной полезности стоимости корпоративных облигаций и премии кредитно-дефолтного свопа (CDS), которые инвестор готов принять, когда параметры модели (рыночная процентная ставка, коэффициент сноса и волатильность рискованных базовых активов) не являются постоянными и зависят от времени. В этом контексте выделены расчет оптимального портфеля инвестора и функция мгновенной

стоимости каждого портфеля. Новизна данного подхода заключается в учете более реалистичных форм базовых параметров, взяв вариант моделей Блэка-Шоулза для оценки цен кредитных инструментов.

Учитывая важность для инвесторов хеджирования рисков, связанных с владением рискованными активами, будущие исследования могут рассмотреть следующие вопросы:

– как оценить цену этих кредитных инструментов в случае, когда базовый актив имеет снос и волатильность, которые зависят не только от времени, но и от другого стохастического процесса, который мы назовем «факторным процессом»;

– как оценить цену этих кредитных инструментов в случае, когда базовый актив имеет снос и волатильность, которые зависят не только от времени, но и от цепи Маркова с  $D$  состояниями.

#### Список источников:

1. Беллман Р. On the theory of dynamic programming // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 1952. – №38. – p. 316-319.
2. Зарифопулу Т. A solution approach to valuation with unhedgeable risks // Finance Stochast. – 2001. – №5. – P. 1-82.
3. Мертон Р., Optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model // Journal of Economic theory. – 1971. – Т. 3. – №4. – pp. 373-413.
4. Сиглох Ж. Utility indifference pricing of credit instruments. Ph.D. Thesis, University of Toronto 2009.
5. Хендерсон В., Хобсон Д. Real options with constant relative risk aversion // *Journal of Economic Dynamics and Control*. – 2002. – №27. – pp. 329-355.
6. Ходжес С. и Нойбергер А. Optimal replication of contingent claims under transaction costs // Review of Future Markets. – 1989. – № 8. – pp. 222-239.
7. Lions P.L. Optimal control of diffusion processes and Hamilton-Jacobi-Bellman equations. Part 1: The dynamic programming principle and applications. Part 2: Viscosity solutions and uniqueness. Comm. PDE 8, 1101-1174 and 1229-1276 (1983).
8. Zhiqiang Zhang., Certainty Equivalent, Risk Premium and Asset Pricing. Higher Education Press and Springer-Verlag 2010, Front. Bus. Res. China. – 2010. – №4(2). – pp. 325-339.

#### Информация об авторах:

**Фока Оливер Джидзем**

Аспирант Брянского государственного технического университета

**Дмитроченко Олег Николаевич**

кандидат физико-математических наук, Брянский государственный технический университет

**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 16.05.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 05.07.2024.**

**The article was submitted 16.05.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 05.07.2024.**

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

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

#### References:

1. Bellman R. On the Theory of Dynamic Programming. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1952;38:316-319.
2. Zariphopoulou T. A Solution Approach to Valuation with Unhedgeable Risks. Finance Stochast. 2001;5:1-82.
3. Merton R. Optimum Consumption and Portfolio Rules in a Continuous-Time Model. Journal of Economic Theory. 1971;3(4):373-413.
4. Sigloch G. Utility Indifference Pricing of Credit Instruments. Ph.D. Thesis. University of Toronto; 2009.
5. Henderson B. Hobson D. Real Options With Constant Relative Risk Aversion. Journal of Economic Dynamics and Control. 2002;27:329-355.
6. Hodges S., Neuberger A. Optimal Replication of Contingent Claims Under Transaction Costs. Review of Future Markets. 1989;8:222-239.
7. Lions P.L. Optimal Control of Diffusion Processes and Hamilton-Jacobi-Bellman Equations. Part 1: The Dynamic Programming Principle and Applications. Part 2: Viscosity Solutions and Uniqueness. Communications in Partial Differential Equations. 1983;8:1101-1174,1229-1276.
8. Zhang Zh. Certainty Equivalent, Risk Premium and Asset Pricing. Frontiers of Business Research in China. 2010;4(2):325-339.

#### Information about the authors:

**Foka Oliver Djidzem**

Graduate student of Bryansk State Technical University

**Dmitrochenko Oleg Nikolaevich**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Bryansk State Technical University

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.056

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-65-74.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФИЦИТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ НА ЗНАЧИМОМ ОБЪЕКТЕ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Максим Валерьевич Ковалев<sup>1✉</sup>, Виталий Александрович Шкаберин<sup>2</sup>,  
Михаил Юрьевич Рытов<sup>3</sup>, Сергей Александрович Шпичак<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> makskovalew@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2312-2279>

<sup>2</sup> vash@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2320-1986>

<sup>3</sup> ozikts@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1920-4989>

<sup>4</sup> frb113@lenta.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6263-1520>

**Аннотация.** Целью исследования является формализация процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимых объектах критической информационной инфраструктуры с помощью функциональной модели. Задача – создание корректной функциональной модели прогнозирования дефицита вычислительных мощностей. Для решения этой задачи используется программный продукт BPwin и методы функционального моделирования. Новизна работы заключается в применении аналитического выравнивания динамических рядов для прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимых объектах критической информационной инфраструктуры. В результате проведенного исследования была построена функциональная модель процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимых объектах критической информационной инфраструктуры. Таким образом полученная функциональная модель отражает технологические особенности процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей и в дальнейшем может быть автоматизирована и применима на значимых объектах критической информационной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** критическая информационная инфраструктура, прогнозирование дефицита вычислительных мощностей, информационная безопасность, функциональное моделирование, динамические ряды, аналитическое выравнивание динамического ряда

**Для цитирования:** Ковалев М.В., Шкаберин В.А., Рытов М.Ю., Шпичак С.А. Моделирование процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимом объекте критической информационной инфраструктуры // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 65-74. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-65-74.

Original article

Open Access Article

## SIMULATING THE PROCESS OF FORECASTING THE COMPUTING POWER DEFICIT AT A SIGNIFICANT OBJECT OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE

Maxim V. Kovalev<sup>1✉</sup>, Vitaly A. Shkaberin<sup>2</sup>, Mikhail Yu. Rytov<sup>3</sup>, Sergey A. Shpichak<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> makskovalew@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2312-2279>

<sup>2</sup> vash@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2320-1986>

<sup>3</sup> ozikts@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1920-4989>

<sup>4</sup> frb113@lenta.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6263-1520>

**Abstract.** The aim of the study is to formalize the process of forecasting the computing power deficit at significant objects of critical information infrastructure using a functional model. The task is to create a correct functional model for forecasting the computing power deficit. To solve this problem, the BPwin software product and functional modelling

*methods are used. The novelty of the work lies in using the analytical alignment of dynamic series to forecast the computing power deficit at significant objects of critical information infrastructure. As the study result, the authors build a functional model of the process of forecasting the computing power deficit at significant objects of critical information infrastructure. Thus, the resulting functional model reflects the technological features of the process of forecasting the computing power deficit and can be automated and applied to significant objects of critical information infrastructure in the future.*

**Keywords:** critical information infrastructure, forecasting the computing power deficit, information security, functional modelling, dynamic series, analytical alignment of dynamic series

**For citation:** Kovalev M.V., Shkaberin V.A., Rytov M.Yu., Shpichak S.A. Simulating the Process of Forecasting the Computing Power Deficit at a Significant Object of Critical Information Infrastructure. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 65-74. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-65-74.

## Введение

На этапе эксплуатации системы безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры может возникнуть дефицит вычислительных мощностей, когда при использовании средств защиты информации основные аппаратные средства не справляются с вычислительной нагрузкой, что приводит к замедлению, а в некоторых случаях невозможности выполнения целевого производственного процесса, или неэффективности, а в некоторых случаях невозможности функционирования средств защиты информации, или к совокупности таких последствий. Наиболее эффективным способом противодействия дефициту вычислительных мощностей является его своевременное выявление с помощью средств прогнозирования и принятие мер по его предотвращению. Прогнозирование дефицита вычислительных мощностей является сложной задачей, решению которой посвящена данная статья.

Безопасности отечественной критической информационной инфраструктуры уделяется большое внимание. Существует Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [1] и другие нормативные акты, в которых подробно рассмотрена процедура создания системы безопасности для значимых объектов критической информационной инфраструктуры, включающая определение категории [2] и состава мер по обеспечению безопасности [3]. Существуют методики, которые позволяют упростить процедуру категорирования [4] и автоматизировать процесс создания системы безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры [5]. Однако после создания системы безопасности обязанность по поддержанию ее работоспособности ложится на специалистов по безопасности субъекта критической информационной инфраструктуры [6]. Их действия регламентируются внутренней организационно-распорядительной документацией [7]. Из установленных законом требований к системе безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры можно сделать вывод о перечне организационно-распорядительной документации, необходимой на объекте. Но методы, с помощью которых специалисты по безопасности решают поставленные задачи, каждый субъект критической информационной инфраструктуры вправе определять самостоятельно [8]. Поэтому часто проблему дефицита вычислительных мощностей решают по факту его возникновения, при отсутствии понимания необходимости его предотвращения и неимением эффективных инструментов его прогнозирования. Что может привести к ущербу от нарушения целевых производственных процессов, возникновения компьютерных инцидентов, а также вследствие возникновения ответственности за неисполнение законодательных требований о защите значимого объекта критической информационной инфраструктуры [9].

## Материалы, модели, эксперименты и методы

В статье был использован программный продукт VRwin для моделирования процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимом объекте критической информационной инфраструктуры. Использовались следующие виды моделей:

- функциональная диаграмма, построенная на основе стандарта IDEF0 для создания модели функций процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей с последующей декомпозицией;
- диаграмма описания состояний перехода объектов, построенная на основе стандарта IDEF3 для описания состояний перехода объектов в процессе оценки состояния системы безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры;
- диаграмма потока данных DFD, наглядно отображающая каким образом информация перемещается от задачи к задаче в рамках процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей [10].

Для построения прогноза возникновения дефицита вычислительных мощностей был использован метод аналитического выравнивания динамического ряда.

## Результаты

Во-первых, была построена контекстная диаграмма в нотации IDEF0, которая дает глобальное описание модели процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимом объекте критической информационной инфраструктуры (рис. 1).



**Рис. 1. Модель процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей для значимого объекта критической информационной инфраструктуры в нотации IDEF0**

*Fig. 1. The process of forecasting the shortage of computing power for the primary object of critical information load in the IDEF0 notation*

Исполнителями в процессе прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на объекте критической информационной инфраструктуры, так же как и во всех других процессах, касающихся безопасности объекта, являются специалисты по безопасности [11]. Инструментом для выполнения прогнозирования дефицита вычислительных мощностей служит программное обеспечение, автоматизирующее описанные в данной статье процессы. Разработка такого программного обеспечения является сложной задачей, требующей отдельного детального рассмотрения. В данной статье допускаем, что такое программное обеспечение существует и выполняет свои функции в полном объеме.

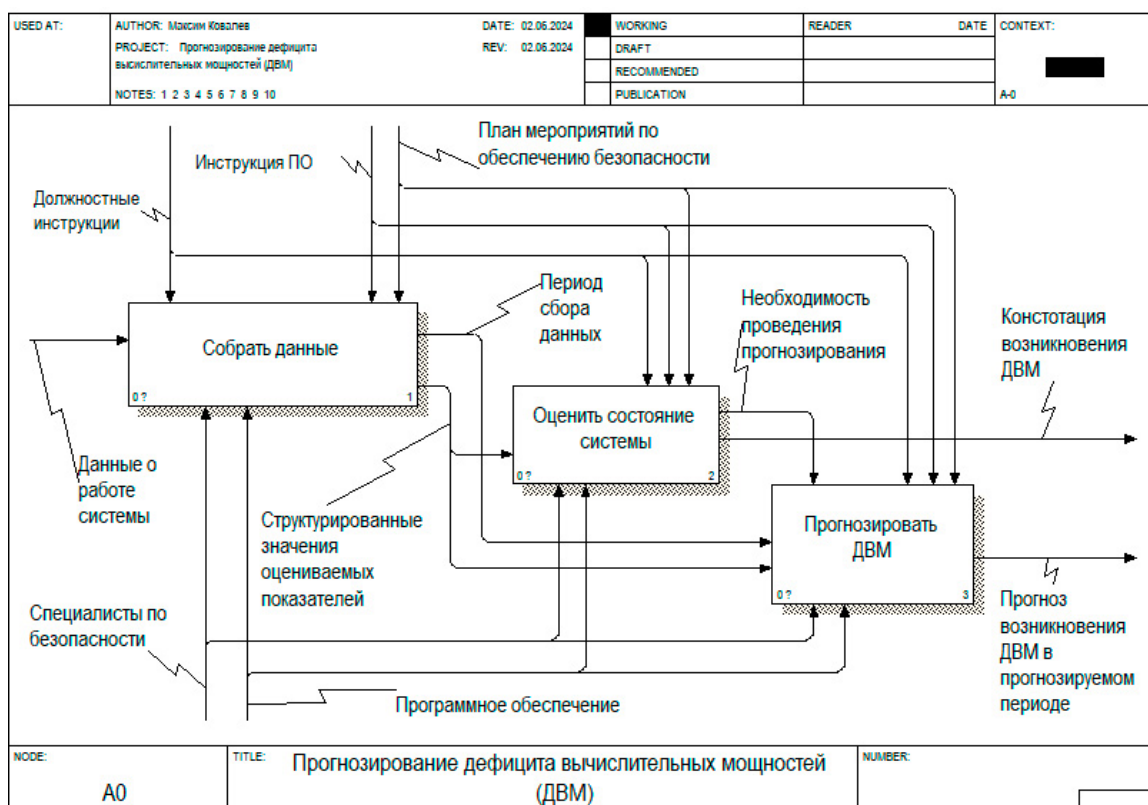
В качестве источников управляющего воздействия используются:

- должностные инструкции специалистов по безопасности субъекта, которые включают в себя требования по проведению прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на каждом значимом объекте критической информационной инфраструктуры организации и подробное руководство по осуществлению этого процесса;
- инструкция к программному обеспечению, используемому в качестве инструмента для проведения прогнозирования дефицита вычислительных мощностей;

– план мероприятий по обеспечению безопасности, в котором указаны сроки и частота проведения прогнозирования дефицита вычислительных мощностей для каждого объекта критической информационной инфраструктуры в зависимости от специфики его работы.

На вход подаются данные о работе системы за период, достаточный для проведения прогнозирования [12]. На выходе, в зависимости от результатов оценки состояния системы либо констатируется факт наступления дефицита вычислительных мощностей в текущий момент времени, что требует немедленных действий по его устранению, либо прогноз, в котором содержится информация о том, наступит ли дефицит вычислительных мощностей в прогнозируемом периоде.

Далее была проведена декомпозиция контекстной диаграммы (рис. 2).



**Рис. 2. Декомпозиция процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей для значимого объекта критической информационной инфраструктуры в нотации IDEF0**

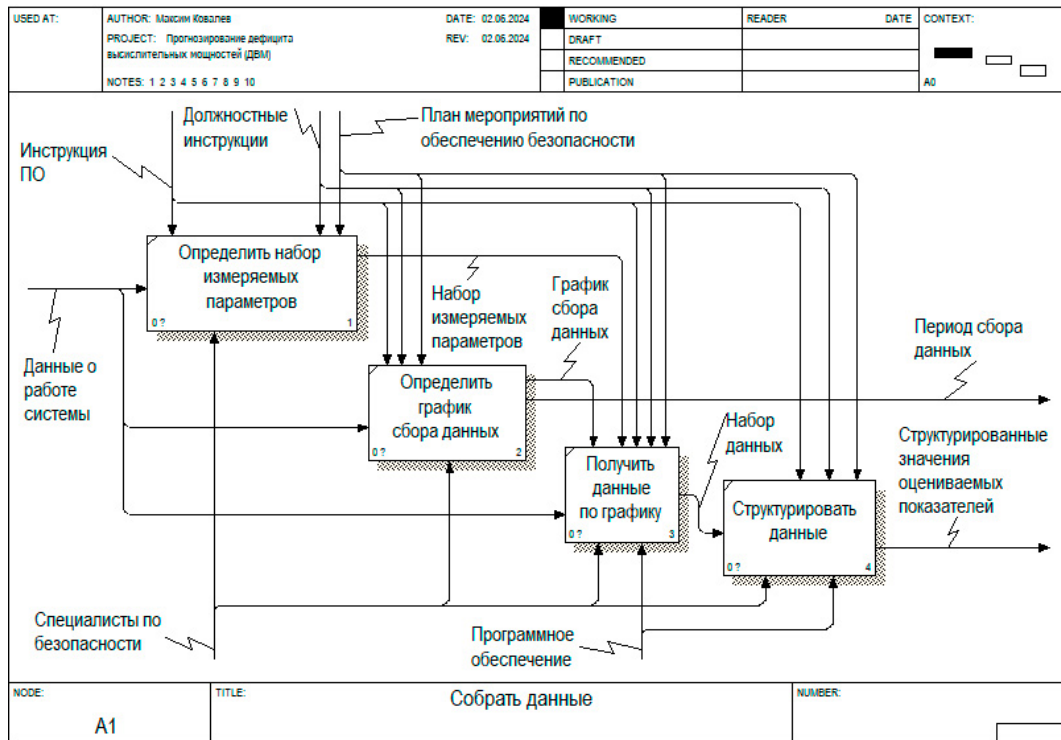
*Fig. 2. Decomposition of the process of forecasting a shortage of computing power for a significant object of critical information infrastructure in the IDEF0 notation*

В результате декомпозиции основного процесса было выделено три подпроцесса: процесс сбора данных; процесс оценки текущего состояния системы; процесс непосредственно построения прогноза.

Процесс сбора данных также был декомпозирован в нотации IDEF0 (рис. 3).

В результате декомпозиции процесса сбора данных были выделены четыре подпроцесса: процесс определения набора измеряемых параметров; процесс определения графика сбора данных; процесс получения данных по графику; процесс структурирования полученных данных.

Набор измеряемых параметров в общем случае включает в себя показатели активности центрального процессора, оперативной памяти и диска каждого из основных аппаратных средств объекта критической информационной инфраструктуры. При необходимости, в случае активного использования графического процессора устройством, его показатели также могут быть включены в набор. Значение каждого из параметров может располагаться в диапазоне от 0 до 100 % и представляет собой процент задействования измеряемого ресурса в момент времени.



**Рис. 3. Декомпозиция процесса сбора данных при прогнозировании дефицита вычислительных мощностей для значимого объекта критической информационной инфраструктуры в нотации IDEF0**  
**Fig. 3. Decomposition of the data collection process when predicting a shortage of computing power for a significant object of critical information infrastructure in the IDEF0 notation**

График сбора данных зависит от графика работы объекта критической информационной инфраструктуры [13]. Сбор данных должен проходить с одинаковыми временными интервалами между замерами и между периодами замеров. Периоды замеров также должны быть равны по времени. Период замера зависит от графика работы объекта.

$$T_{\text{сбор}} = (T_1, T_2, \dots, T_i);$$

$$T_i = (t_{31}, t_{32}, \dots, t_{3j}),$$

где  $T_{\text{сбор}}$  – период сбора данных;  $T_1, T_2, \dots, T_i$  – периоды проведения замеров;  $t_{31}, t_{32}, \dots, t_{3j}$  – времена замеров.

Получение выбранного набора данных по установленному графику должно реализовываться в автоматизированном режиме с помощью программного обеспечения и контролироваться специалистами по безопасности без их непосредственного участия в процессе сбора, а только корректироваться ими при необходимости.

Собранные данные необходимо структурировать и представить в удобном для дальнейшей обработки виде, что также должно происходить в автоматизированном режиме с помощью программного обеспечения. Данные должны представлять собой набор таблиц, для каждого периода проведения замеров  $T_i$  и каждого включенного в набор параметра, содержащих время замера и результат замера (табл. 1).

Таблица 1

**Пример таблицы данных для прогнозирования дефицита вычислительных мощностей**

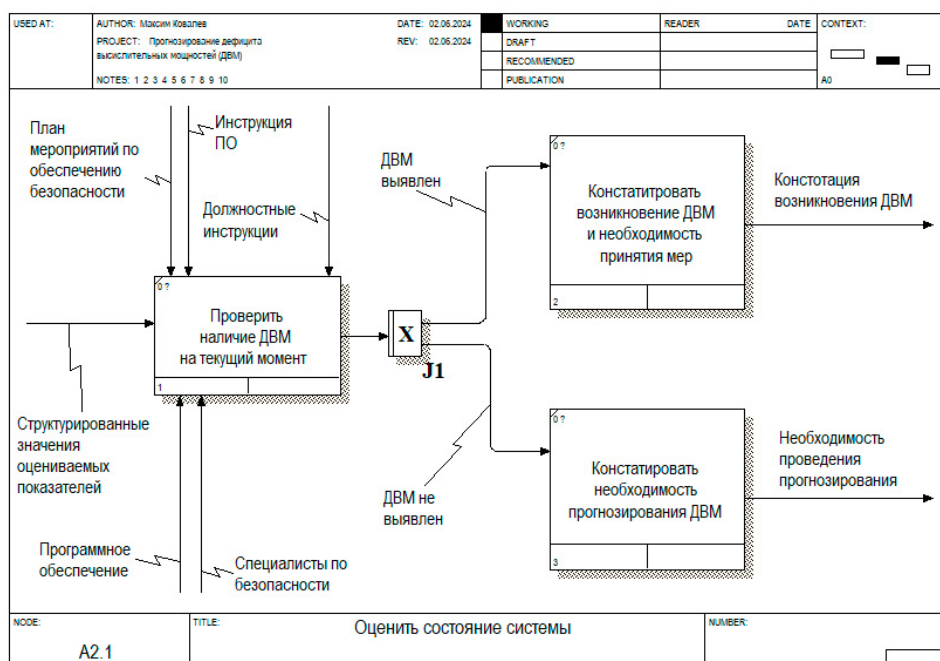
Table 1

*Example of a data table for forecasting computing power shortages*

Период проведения замеров, $T_i$	Время замера, $t_3$	Значение параметра 1, $p_1$	Значение параметра 2, $p_2$	...	Значение параметра $n$ , $p_n$
$T_i$	$t_{31}$	$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$
$T_i$	$t_{32}$	$p_{12}$	$p_{22}$	...	$p_{n2}$
...	...	...	...	...	...
$T_i$	$t_{3j}$	$p_{1j}$	$p_{2j}$	...	$p_{nj}$



Поскольку в процессе оценки состояния системы происходит процедура выбора, этот процесс был декомпозирован в нотации IDEF3 (рис. 4).



**Рис. 4. Декомпозиция процесса оценки состояния системы при прогнозировании дефицита вычислительных мощностей для значимого объекта критической информационной инфраструктуры в нотации IDEF3**

**Fig. 4. Decomposition of the process of assessing the state of the system when predicting a shortage of computing power for a significant object of critical information infrastructure in IDEF3 notation**

В результате декомпозиции процесса оценки состояния системы было выделено три подпроцесса: процесс проверки наличия дефицита вычислительных мощностей на текущий момент; процесс констатации возникновения дефицита вычислительных мощностей и необходимости принятия мер; процесс констатации необходимости прогнозирования дефицита вычислительных мощностей.

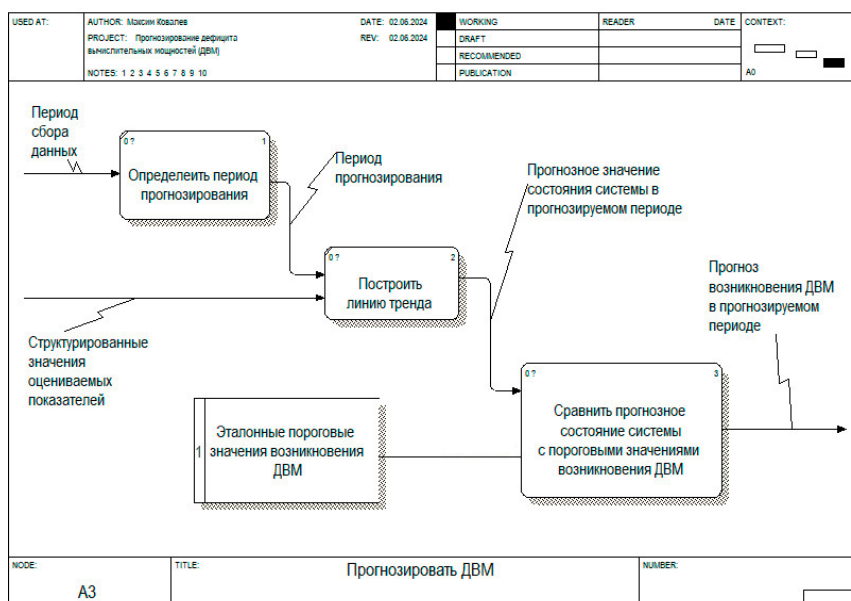
При проверке наличия дефицита вычислительных мощностей на текущий момент происходит выявление маркеров наступления дефицита вычислительных мощностей на основе структурированных значений оцениваемых показателей, полученных из предыдущего процесса. Главным маркером наступления дефицита вычислительных мощностей служит количество одновременных пиковых значений оцениваемых показателей в определенный период проведения замеров  $T_i$  [14]. Выявление других маркеров дефицита вычислительных мощностей и доказательство их эффективности является сложной задачей, требующей отдельного детального рассмотрения.

Полученное значение маркеров сравнивается с эталонными пороговыми значениями возникновения дефицита вычислительных мощностей. Такие значения могут меняться от объекта к объекту и требуют индивидуального расчета. Определение метода расчета эталонных пороговых значений возникновения дефицита вычислительных мощностей и доказательство его эффективности также является сложной задачей, требующей отдельного детального рассмотрения.

В зависимости от результатов сравнения происходит разветвление процесса. Если дефицит вычислительных мощностей обнаружен в текущем моменте времени, то его прогнозирование не требуется, остается только констатировать его наличие и принять меры для его устранения. Если дефицит вычислительных мощностей не обнаружен в текущий момент, то необходимо прогнозировать его возникновение в будущем.

Процесс непосредственного получения прогноза возникновения дефицита вычислительных мощностей на значимом объекте критической информационной

инфраструктуры должен быть автоматизирован и выполняться средствами программного обеспечения, поэтому он был декомпозирован в виде DFD диаграммы (рис. 5).



**Рис. 5. Декомпозиция процесса прогнозирования при прогнозировании дефицита вычислительных мощностей для значимого объекта критической информационной инфраструктуры в нотации DFD**  
**Fig. 5. Decomposition of the forecasting process when predicting a shortage of computing power for a significant object of critical information infrastructure in DFD notation**

В результате декомпозиции процесса непосредственного получения прогноза возникновения дефицита вычислительных мощностей было выделено три подпроцесса: процесс определения периода прогнозирования; процесс построения линии тренда; процесс сравнения прогнозного значения состояния системы с эталонными пороговыми значениями возникновения дефицита вычислительных мощностей.

Определение периода прогнозирования происходит на основании периода сбора данных, так как прогноз можно сделать на период не более 25 % от имеющихся данных. Таким образом определяется максимально возможный период прогнозирования.

$$T_{\text{прогноз}} = (T_{i+1}, T_{i+2}, \dots, T_k);$$

$$k \leq 0,25 \cdot i;$$

$$k \in \mathbb{Z},$$

где  $T_{\text{прогноз}}$  – период прогнозирования,  $T_{i+1}, T_{i+2}, \dots, T_k$  – периоды будущих замеров.

Прогноз строится посредством аналитического выравнивания динамического ряда. Выравнивание производится с применением уравнения прямой:

$$y_t = a_0 + a_1 t,$$

где  $y_t$  – выровненные значения уровней;  $a_0$  – свободный член уравнения;  $a_1$  – коэффициент регрессии;  $t$  – период времени.

Параметры уравнения ( $a_0, a_1$ ) определяются путем составления и решения системы нормальных уравнений методом наименьших квадратов:

$$\sum y = n a_0 + a_1 \sum t;$$

$$\sum y t = a_0 \sum t + a_1 \sum t^2,$$

где  $n$  – число уровней ряда.

Для получения уровня линии тренда строится вспомогательная таблица (табл. 2).

Таблица 2

**Вспомогательная таблица для получения уровня линии тренда**

Table 2

*Auxiliary table for obtaining the trend line level*

Период проведения замеров, $T_i$	Количество одновременных пиковых значений оцениваемых показателей, $y$	Порядковый номер периода проведения замеров, $t$	$yt$	$t^2$	$y_{теор.}$
$T_1$	$y_1$	1	$y_1 \cdot 1$	1	$y_{теор. 1}$
$T_2$	$y_2$	2	$y_2 \cdot 2$	4	$y_{теор. 2}$
...	...	...	...	...	...
$T_i$	$y_i$	$i$	$y_i \cdot i$	$i^2$	$y_{теор. i}$

Прогноз строится посредством подстановки каждого порядкового номера периодов будущих замеров прогнозируемого периода  $T_{\text{прогноз}}$  в полученное уравнение. Полученное значение количества одновременных пиковых значений оцениваемых показателей сравнивается с эталонными пороговыми значениями возникновения дефицита вычислительных мощностей. Если полученное значение меньше эталонного, то дефицит в рассматриваемом периоде будущих замеров не наступает. Если значение больше или равно эталонному, то это говорит о возникновении дефицита вычислительных мощностей в рассматриваемом периоде будущих замеров [15].

### Заключение

С помощью средств программного продукта Vpwin была построена функциональная модель процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимом объекте критической информационной инфраструктуры. Отдельные процессы модели были декомпозированы в нотациях IDEF0, IDEF3 и DFD. Для прогнозирования дефицита вычислительных мощностей был применен метод аналитического выравнивания динамических рядов. Также по теме исследования были выявлены сложные задачи, требующие отдельного детального рассмотрения, такие как: выявление маркеров дефицита вычислительных мощностей и доказательство их эффективности; определение метода расчета эталонных пороговых значений возникновения дефицита вычислительных мощностей; разработка программного обеспечения на основе созданной функциональной модели.

Полученная функциональная модель является основой дальнейших исследований и разработок для автоматизации процесса прогнозирования дефицита вычислительных мощностей на значимых объектах критической информационной инфраструктуры.

#### Список источников:

#### References:

1. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 N 187-ФЗ // СПС КонсультантПлюс.
2. Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 N 127 «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений» // СПС КонсультантПлюс.
3. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 N 239 «Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической

1. Federal Law No 187-FZ of June 26, 2017 "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation"; 2018. SPS: ConsultantPlus.
2. Resolution of the Government of the Russian Federation No 127 of February 8, 2018 "On Approval of the Rules for Categorizing Critical Information Infrastructure Objects of the Russian Federation, as well as the List of Indicators of Criteria for the Significance of Critical Information Infrastructure Objects of the Russian Federation and Their Values"; 2018. SPS: ConsultantPlus.
3. Order of the FSTEC of Russia No 239 of December 25, 2017 "On Approval of Requirements for Ensuring the Security of Significant Objects of Critical

информационной инфраструктуры Российской Федерации» // СПС КонсультантПлюс.

4. Численное исследование эффективности машинного обучения в задачах прогнозирования категории значимости объектов критической информационной инфраструктуры / М.Ю. Рытов, Ю.Ю. Громов и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 10. – С. 29-44.

5. Аудит и мониторинг состояния объектов информатизации в процессе проектирования комплексных систем защиты информации значимых объектов критической информационной инфраструктуры / М.Ю. Рытов, Н.О. Мусиенко и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 10. – С. 10-18.

6. Приказ ФСТЭК России от 21.12.2017 N 235 «Об утверждении Требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования» // СПС КонсультантПлюс.

7. Постановление Правительства РФ от 15.07.2022 N 1272 «Об утверждении типового положения о заместителе руководителя органа (организации), ответственном за обеспечение информационной безопасности в органе (организации), и типового положения о структурном подразделении в органе (организации), обеспечивающем информационную безопасность органа (организации)» // СПС КонсультантПлюс.

8. Приказ ФСБ России от 19.06.2019 N 282 «Об утверждении Порядка информирования ФСБ России о компьютерных инцидентах, реагирования на них, принятия мер по ликвидации последствий компьютерных атак, проведенных в отношении значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // СПС КонсультантПлюс.

9. Давыдова Т.И., Синешчук Ю.И. Политика информационной безопасности в системе мероприятий защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры // Методология развития управления, экономики и образования. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2022. – С. 101-111.

10. BPwin [Электронный ресурс] // Менеджмент качества, URL: <https://www.kpms.ru/Automatization/BPwin.htm>.

11. Беляков М.И., Якунин В.И. Подход к моделированию целенаправленного процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. – 2020. – № 29. – С. 43-44.

12. Прокушев Я.Е., Пономаренко С.В., Шишов Н.В. Моделирование процессов проектирования систем защиты информации в критических информационных инфраструктурах // Computational Nanotechnology. – 2022. – Т. 9, № 2. – С. 45-55.

Information Infrastructure of the Russian Federation; 2017. SPS: ConsultantPlus.

4. Rytov MYu, Gromov YuYu, et al. Numerical Study of the Efficiency of Machine Learning in Problems of Forecasting the Significance Category of Critical Information Infrastructure Objects. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2022;10:29-44.

5. Rytov MYu, Musienko NO, et al. Audit and Monitoring of the State of Informatization Objects in the Process of Designing Complex Information Protection Systems for Significant Objects of Critical Information Infrastructure. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2022;10:10-18.

6. Order of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia No 235 of December 21, 2017 “On Approval of the Requirements for the Creation of Security Systems for Significant Objects of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation and Ensuring Their Functioning”; 2017. SPS: ConsultantPlus.

7. Government Decree of Russia No. 1272 of July 15, 2022 “On Approval of a Model Regulation on the Deputy Responsible for Ensuring Information Security and a Model Regulation on a Subdivision that Ensures Information Security”; 2022. SPS: ConsultantPlus.

8. Order of the Federal Security Service of Russia No. 282 of 2019 June 19 “On Approval of the Procedure for Informing the FSB of Russia About Computer Incidents, Responding to Them, Taking Measures to Eliminate the Consequences of Computer Attacks Conducted Against Significant Objects of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation”; 2019. SPS: ConsultantPlus.

9. Davydova TI, Sineshchuk YuI. Information Security Policy in the System of Information Protection Measures for Critical Information Infrastructure Objects. In: Methodology for the Development of Management, Economics and Education. Penza: Privolzhsky House of Knowledge; 2022. p. 101-111.

10. BPwin. Quality Management. [Internet]. Available from: <https://www.kpms.ru/Automatization/BPwin.htm>

11. Belyakov M.I., Yakunin V.I. Approach to Modelling the Targeted Process of Operating the Information Security System of a Critical Information Infrastructure Facility. Methods and Technical Means of Ensuring Information Security. 2020;29:43-44.

12. Prokushev Ya.E., Ponomarenko S.V., Shishov N.V. The Modelling of Processes of Design of Information Protection Systems in Critical Information Infrastructures. Computational Nanotechnology. 2022;9(2):45-55.

13. Язов Ю.К., Соловьев С.В. Моделирование значимых объектов критической информационной инфраструктуры в интересах исследования защищенности применяемых в них информационных технологий // Безопасные информационные технологии: Сборник трудов Одиннадцатой международной научно-технической конференции, Москва, 06–07 апреля 2021 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Москва), 2021. – С. 363-369.

14. Разработка экспертной системы формирования перечня угроз безопасности информации для объектов КИИ / Д. А. Заколдаев, В. Г. Швед и др. // Защита информации. Инсайд. – 2021. – № 6(102). – С. 25-29.

15. Ларичева Е.А. Применение динамических рядов для анализа и прогнозирования в логистике: Практикум. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2018. – 68 с.

#### **Информация об авторах:**

##### **Ковалев Максим Валерьевич**

ассистент кафедры «Системы информационной безопасности»

##### **Шкаберин Виталий Александрович**

кандидат технических наук, доцент, Первый проректор по учебной работе и цифровизации

##### **Рытов Михаил Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности»

##### **Шпичак Сергей Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы информационной безопасности»

13. Yazov YuK, Soloviev SV. Simulation of Significant Objects of Critical Information Infrastructure in the Interest of Investigating the Security of Information Technologies Used Therein. In: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference on Secure Information Technologies; 2021 Apr 06-07; Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2021. p. 363-369.

14. Zakoldaev DA, Shved VG, et al. Development of an Expert System for Forming a List of Information Security Threats for Objects of Critical Information Infrastructure. Information Protection. Inside. 2021;6(102):25-29.

15. Laricheva E.A. Application of Dynamic Series for Analysing and Forecasting in Logistics. Bryansk: Bryansk State Technical University; 2018.

#### **Information about the authors:**

##### **Kovalev Maksim Valerievich**

Assistant at the Department of Information Security Systems

##### **Shkaberin Vitaly Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, First Vice-Rector for Academic Affairs and Digitalization

##### **Rytov Mikhail Yurievich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Security Systems

##### **Shpichak Sergey Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Security Systems

**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 05.06.2024; одобрена после рецензирования 27.06.2024; принята к публикации 05.07.2024.**

**The article was submitted 05.06.2024; approved after reviewing 27.06.2024; accepted for publication 05.07.2024.**

**Рецензент** – Еременко В.Т., доктор технических наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева.

**Reviewer** – Eremenko V.T., Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev.

## Управление в организационных системах

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.02

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-75-83

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СБОРКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

Сергей Александрович Шептунов<sup>1</sup>, Андрей Владимирович Аверченков<sup>2</sup>,  
Елена Эдуардовна Аверченкова<sup>3</sup>, Алексей Александрович Шабанов<sup>4</sup>

<sup>1, 2</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской Академии Наук,  
г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>4</sup> ООО "ЭРГА", г. Калуга, Россия

<sup>1</sup>ship@ikti.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7947-9525>

<sup>2</sup>mahar@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0196-1332>

<sup>3</sup>lena\_ki@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

<sup>4</sup>aashabanov86@mail.ru

**Аннотация.** Информационные основания поддержки принятия решений по оптимальному формированию автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки востребованы на предприятиях автомобилестроительного кластера. Предложено в процессе формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки и совокупности запасного оборудования и запчастей разработать две базы данных. Это позволит в процессе функционирования автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки накапливать информацию за счет обратной связи о состоянии ее подсистем. В этих целях предложена база данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки», а также база данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки». Представлена информация о регистрационных выходных данных, структуре и количестве записей двух разработанных баз данных. Произведен расчет экономического эффекта при затратах на технологическую подготовку производства с использованием описанных баз данных.

**Ключевые слова:** базы данных, система технологического обеспечения механической сборки, предприятия автомобилестроительного кластера

**Для цитирования:** Шептунов С.А., Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А. Информационные основания системы технологического обеспечения механической сборки в условиях цифровой трансформации предприятий автомобилестроительного кластера // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 75-83. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-75-83.

Original article

Open Access Article

# INFORMATION GROUNDS FOR THE TECHNOLOGICAL SUPPORT SYSTEM FOR MECHANICAL ASSEMBLY IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE AUTOMOTIVE CLUSTER ENTERPRISES

Sergey A. Sheptunov<sup>1</sup>, Andrey V. Averchenkov<sup>2</sup>, Elena E. Averchenkova<sup>3</sup>, Alexey A. Shabanov<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>4</sup> Erga LLC, Kaluga, Russia

<sup>1</sup>ship@ikti.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7947-9525>

<sup>2</sup>mahar@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0196-1332>

<sup>3</sup>lena\_ki@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

<sup>4</sup>aashabanov86@mail.ru

**Abstract.** *Information grounds for supporting decision-making on the optimal formation of automated systems for technological preparation of assembly production are in demand at the automotive cluster enterprises. The paper proposes to develop two databases in the process of forming the optimal set of control and verification equipment and the set of spare equipment and spare parts. This will allow accumulating information due to the feedback on the state of its subsystems in the process of operating automated systems for the technological preparation of assembly production. For this purpose, the paper proposes the database “A set of the system elements for providing mechanical assembly”, as well as the database “Statistical information for forming the stock of assembly equipment and spare parts in the system for ensuring mechanical assembly”. The work presents the information on the registration output, the structure and number of records of two developed databases, calculates the economic effect in the cost of technological preparation of production using the described databases.*

**Keywords:** databases, system of technological support of mechanical assembly, automotive cluster enterprises

**For citation:** Sheptunov S.A., Averchenkov A.V., Averchenkova E.E., Shabanov A.A. Information Grounds for the Technological Support System for Mechanical Assembly in the Context of Digital Transformation of the Automotive Cluster Enterprises. *Automation and modeling in design and management*, 2024, no. 3 (25). pp. 75-83. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-75-83.

## Введение

В условиях предприятий автомобилестроительного кластера совокупность производственного оборудования, обеспечивающего процессы сборки, представляет собой разнородную сложную систему. Ранее данная совокупность и обеспечивающие ее работу автоматизированные системы управления не были рассмотрены как единая система подготовки сборочного производства на основе резьбовых соединений, поэтому разработка ее математического, информационного и алгоритмического обеспечения является важной и актуальной задачей для развития сборочного производства.

Вопросы формирования состава оборудования, автоматизации механосборочных цехов и автоматизированных систем управления технологическими процессами были рассмотрены, в частности, в работах Соломенцева Ю.М. [1 – 3], Долгова В.А. [4], Фролова Е.Б. [5, 6], Тимирязева В.А., Схиртладзе А.Г. [7], Дацко А.Г. [8]. Особенности разработки сборочных технологических процессов, расчета параметров сборочного оборудования и затяжки резьбовых соединений рассматривались в работах ученых Аббясова В.М. [9, 10], Бухтеевой И.В., Елхова П.Е. [10], Ламина И.И. [11]. Работы иностранных авторов Zhang X., Zeng J. [12], Basten R.J.I., Van der Heijden M.C., Schutten J.M.J. [13], Chen N., Ou L., Bai F. [14], Tan L., Sun C., Pang M., Xiang K., Tang B. [15] посвящены оборудованию сборки изделий на основе резьбовых соединений, работы Geda, M.W., Kwong, C.K., Jiang, H. [16] – автоматизированным системам технологической подготовки производства, исследования Tesfay Y.Y. [17], Xu W., Cheng Q., Yang C. [18] – автоматизации сборочных производств.

Изучение отечественных и зарубежных публикаций по автомобилестроительному кластеру показало, что на сегодняшний день востребованы формализация и разработка соответствующих алгоритмов для автоматизированных систем технологической подготовки



производства сборки. Кроме того, информационное обеспечение автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки позволит обеспечить оптимальную совокупность оборудования, применяемого на крупных предприятиях конвейерной отверточной сборки.

### **Предметная область исследования**

Поддержка принятия решений по оптимальному формированию автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки должна быть обеспечена информацией о конкретных элементах совокупности сборочного оборудования. Информационное сопровождение процесса принятия решений позволит повысить эффективность сборочного производства. Технолог получает четкое представление о том, какое оборудование используется для сборки изделия, что в целом упрощает его работу и позволяет оптимизировать процесс выбора конкретных сборочных инструментов, станков и датчиков для проверок момента затяжки сборочных инструментов.

В качестве оснований информационной системы технологического обеспечения механической сборки автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки могут выступать классификаторы, позволяющие группировать оборудование по следующим параметрам: степень автоматизации процесса затяжки, конструкция сборочного инструмента, возможность и удобство калибровки сборочного инструмента.

Ранее в работах авторов [19 – 21] была выполнена реализация разработанных моделей, классификаторов, баз данных и алгоритмов управления подсистемами автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки. Также в работе [22] авторы описали информационное обеспечение поддержки принятия решений, формирующих систему обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера.

В процессе формирования информационного сопровождения системы технологического обеспечения механической сборки возникла необходимость разработать базу данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки», а также базу данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки». Это позволит учесть особенности цифровой трансформации предприятий автомобилестроительного кластера, в том числе тот факт, что в процессе функционирования автоматизированных систем технологической подготовки производства сборки происходит накопление баз данных информацией за счет обратной связи о состоянии подсистем ее составляющих.

### **Материалы, модели, эксперименты и методы**

*База данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки».* Структура базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки» обусловлена наличием необходимой и достаточной информации для принятия управленческих решений по формированию оптимальной совокупности оборудования контроля и проверки и совокупности запасных сборочных инструментов и запасных частей.

База данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки» имеет регистрационный номер №2021623100 от 21.12.2021 (рис. 1).

Среда разработки базы данных: Microsoft Excel. Объем базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки» – 13 884 записей (рис. 2). База данных содержит следующую информацию в столбцах с первого по восьмой: местоположение элемента совокупности сборочного оборудования; серийный номер элемента совокупности сборочного оборудования; артикул элемента совокупности сборочного оборудования; выполняемые элементом совокупности сборочного оборудования операции технологического процесса; числовое значение момента затяжки элемента совокупности сборочного оборудования измеряемое в ньютон-метр; дата поступления элемента совокупности

сборочного оборудования на рабочий пост в цехе; индекс воспроизводимости процесса  $C_p$  элемента совокупности сборочного оборудования; индекс воспроизводимости процесса  $C_{pk}$  элемента совокупности сборочного оборудования.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ RU 2021623100



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ**

Номер регистрации (свидетельства): <b>2021623100</b>	Авторы: Аверченкова Елена Эдуардовна (RU), Шабанов Алексей Александрович (RU)
Дата регистрации: <b>21.12.2021</b>	Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» (RU)
Номер и дата поступления заявки: <b>2021622990 09.12.2021</b>	
Дата публикации: <b>21.12.2021</b>	

Название базы данных:  
«База данных: совокупность элементов системы обеспечения механической сборки»

Реферат:  
База данных предназначена для информационного обеспечения поддержки принятия решений по созданию системы обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера. Область применения: организационно-технологическая система обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений, создаваемая на крупных сборочных предприятиях. Функциональные возможности: хранение и накопление информации об элементах совокупности сборочного оборудования, используемой для поддержки принятия решений в системе обеспечения механической сборки. База данных содержит информационное обеспечение математических моделей элементов совокупности сборочного оборудования организационно-технологической системы обеспечения механической сборки.

Вид и версия системы управления базой данных: Excel

Объем базы данных: 140524 байт

Рис. 1. Свидетельство о регистрации базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки»

Fig. 1. Certificate of registration of the database «Set of elements of the mechanical assembly support system»

Идентификационный номер элемента совокупности	Степень износа инструмента	Артикул (обозначение инструмента)	Выполняемые операции (обозначение операции)	Числовые значения параметров сборки	Дата изготовления инструмента	Время изготовления процесса СД	Время изготовления процесса СД
373120462	00000004	АНКСТ.КАСТ.15	СР702КАМ.11	4,00	08.12.2020	2,11	1,43
373120463	00000004	КАСТ.КАМ	СР702КАМ.11	2,00	24.12.2020	2,04	1,47
373120464	00000014	КАСТ.КАМ	СР702КАМ.11	2,00	28.12.2020	2,04	1,48
373120465	00000011	КАСТ.КАМ	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,37	1,51
373120466	00000011	КАСТ.11	СР702КАМ.11	2,00	30.11.2020	2,19	1,51
373120467	00000024	КАСТ.КАМ	СР702КАМ.11	2,00	22.12.2020	2,14	1,52
373120468	00000019	АНКСТ.КАСТ.15	СР702КАМ.11	3,00	13.01.2021	3,33	2,09
373120469	00000004	АНКСТ.КАСТ.15	СР702КАМ.11	14,00	17.12.2020	2,93	2,11
373120470	00000006	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	30.11.2020	2,10	2,07
373120471	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120472	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	30.11.2020	2,10	2,07
373120473	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120474	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120475	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120476	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120477	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120478	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120479	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120480	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120481	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120482	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120483	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120484	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120485	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120486	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120487	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120488	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120489	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120490	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120491	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120492	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120493	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120494	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120495	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120496	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120497	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120498	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120499	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04
373120500	00000004	КАСТ.15	СР702КАМ.11	2,00	18.12.2020	2,03	2,04

Рис. 2. Структура базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки»

Fig. 2. The structure of the database «The set of elements of the mechanical assembly support system»

Назначение базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки» – накопление информации об элементах совокупности сборочного оборудования, например, об измерении моментов затяжки. Также информация базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки» может применяется при формировании оптимальной совокупности запасных сборочных инструментов, т.к. совокупность запасных сборочных инструментов призвана подготовить замену неисправного оборудования в установленные сроки.

Развитием базы данных «Совокупность элементов системы обеспечения механической сборки» может быть ее расширение полями «Степень износа  $k$ -ого сборочного инструмента» и «технологические приспособления, используемые с  $k$ -м сборочным инструментом».

База данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки». Структура базы данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки» представляет сведения об отказах конкретных элементов совокупности сборочного оборудования и совокупности оборудования контроля и поверки. Сведения, приведенные в представленной базе данных, могут быть использованы для последующего принятия решений в автоматизированной системе технологической подготовки производства сборки в части выбора необходимого и достаточного запаса сборочного оборудования и запчастей. База данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки» имеет регистрационный номер №2021623159 от 23.12.2021 (рис. 3).

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU** 2021623159



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ**

Номер регистрации (свидетельства): <b>2021623159</b>	Авторы: <b>Аверченкова Елена Эдуардовна (RU), Шабанов Алексей Александрович (RU)</b>
Дата регистрации: <b>23.12.2021</b>	Правообладатель: <b>ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «Брянский государственный технический университет» (RU)</b>
Номер и дата поступления заявки: <b>2021622904 06.12.2021</b>	
Дата публикации: <b>23.12.2021</b>	
Контактные реквизиты: <b>нет</b>	

---

**Название базы данных:**  
«База данных: статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки»

**Реферат:**  
Назначение: информационное обеспечение поддержки принятия решений по формированию совокупности запасного сборочного оборудования и запасных частей на предприятиях автомобилестроительного кластера. Область применения: организационно-технологическая система обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений, создаваемая на крупных сборочных предприятиях. Функциональные возможности: хранение и накопление информации об отказах элементов совокупности сборочного оборудования, используемой для продержки принятия решений в системе обеспечения механической сборки. База данных содержит информационное обеспечение поддержки принятия решений на основе статистики отказов и замененных деталей элементов совокупности сборочного оборудования.

**Вид и версия системы управления базой данных:** Excel

**Объем базы данных:** 23743 Байт

**Рис. 3. Регистрация базы данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки» в Федеральной службе по интеллектуальной собственности**

**Fig. 3. Registration of the database «Statistical information for the formation of a stock of assembly equipment and spare parts in the mechanical assembly support system» in the Federal Service for Intellectual Property**

Среда разработки базы данных – Microsoft Excel. Объем базы данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки» – 1328 записей (рис. 4).



**Рис. 4. Структура базы данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки»**  
**Fig. 4. The structure of the database «Statistical information for the formation of a stock of assembly equipment and spare parts in the mechanical assembly support system»**

База данных содержит следующую информацию (столбцы с 1-го по 8-й): о дате выдачи в производство элемента совокупности сборочного оборудования; о дате поломки сборочного элемента совокупности сборочного оборудования; внутренний номер сборочного инструмента в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки; серийный номер элемента совокупности сборочного оборудования присваиваемый производителем; модель элемента совокупности сборочного оборудования; срок работы элемента совокупности сборочного оборудования; вид исправности элемента совокупности сборочного оборудования и замененные при его ремонте детали; числовое значение момента затяжки, на который настроен элемент совокупности сборочного оборудования измеряемое в Ньютон-метр.

База данных «Статистическая информация для формирования запаса сборочного оборудования и запчастей в системе обеспечения механической сборки» накапливает сведения об отказах конкретных позиций сборочного оборудования, а также об отказах оборудования контроля и поверки. Информация, представленная в базе данных, касается сроков работы оборудования, а также датах выхода из строя. Указанные сведения могут быть применимы для расчета численности запасных инструментов, приборов и приспособлений для последующего изучения статистики отказов и расчета оптимального количества запасных позиций потребного оборудования. Сведения о характере неисправности конкретной позиции сборочного оборудования или оборудования контроля и поверки, а также сведения об использованных при его ремонте деталях также может быть применена для конкретизации потребных запасных частей к оборудованию.

### Результаты и их обсуждение

Рассмотренные базы данных могут быть использованы в работе предприятий автомобилестроительного кластера. На примере предприятия ООО «СМРК Аутомотив Текнолоджи Ру» были проведены экспериментальные исследования и рассчитана экономия затрат от применения разработанных баз данных. В качестве области расчетов была выбрана сфера технологической подготовки производства, в том числе на выполнение операций калибровки оборудования, на закупку оборудования и запчастей.

Рассмотрим экономию затрат на технологическую подготовку производства, при этом учтем размер часовой ставки занятого инженера-технолога. Примем, что средняя оплата в час работника составит  $D_{и} = 500$  руб/час (с социальными отчислениями). Экономический эффект, определяемый с учетом затрат на технологическую подготовку производства может быть определен следующим образом (1):

$$\Delta Э_i = \Delta T_i \cdot D_{и}, \quad (1)$$

где  $\Delta Э_i$  – формируемая экономия затрат на технологическую подготовку производства, получаемая с учетом обеих представленных баз данных;  $\Delta T_i$  – экономия затрат с учетом временного фактора.

Экономия затрат на технологическую подготовку производства в относительном выражении представлена в выражении (2):

$$\Delta T_{\Pi i} = \frac{\Delta T_i}{T_{Б}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $\Delta T_{\Pi i}$  – экономия затрат на технологическую подготовку производства с учетом использования баз данных, %;  $T_{Б}$  – общая трудоемкость без учета возможности использования представленных обеих баз данных, ч.

Расчет производился для 3350 единиц совокупности сборочного оборудования на примере предприятия ООО «СМРК Аутомотив Текнолоджи Ру». Общая трудоемкость технологической подготовки производства без применения разработанных баз данных составила  $T_{Б} = 960$  ч. Таким образом, расчет экономии затрат на технологическую подготовку производства с применением каждой из разработанных баз данных составит:

$$\Delta T = 40 \text{ ч,}$$

$$\Delta T_{\Pi} = (40/960) \cdot 100 \% = 4,17 \%,$$

$$\Delta \text{Э} = 40 \cdot 500 = 20\,000 \text{ руб.,}$$

$$\Delta T_{\Pi} = 24 \text{ ч,}$$

$$\Delta T_{\Pi} = (24/960) \cdot 100 \% = 2,5 \%,$$

$$\Delta \text{Э} = 24 \cdot 500 = 12\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, экономический эффект при затратах на технологическую подготовку производства с применением двух описанных выше баз данных составит 32 000 руб.

### Заключение

Таким образом, использование представленных баз данных позволяет обеспечить снижение трудоемкости технологической подготовки производства и обеспечивает оптимизацию работы оператора по периодической калибровке оборудования. Важно, что применение указанных баз данных востребовано в условиях работы предприятий автомобилестроительного кластера. Внедрение описанных баз данных способствует значительной экономии финансовых затрат на закупку оборудования и запчастей при формировании организационно-технологической системы обеспечения механической сборки.

#### Список источников:

1. Solometsev Yu.M., Frolov E.B. "Digital Twin" of manufacturing system – promising tool to increase machine park effectiveness of engineering enterprise // *Machine Park*. – 2018. – No.8. – pp. 36.-39.
2. Planning in modern systems of production control / Yu.M. Solomentsev, R.R. Zagidullin, E.B. Frolov // *Engineering Technique*. – 2010. – No.4. – pp. 76-81.
3. Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. Modern methods to increase effectiveness of engineering enterprises // *Engineering Technique*. – 2015. – No.8. – pp. 54-58.
4. Dolgov, V.A., Kabanov A.A. Basic approaches to formation of information model of industrial-processing system of engineering enterprise // *Automation. Modern Technologies*. – 2018. – No.4. – pp. 178-184.
5. How to achieve production "transparency" or ISO Standards and industrial soft at enterprise / E.B. Frolov, V.V. Kryukov, D.M. Timofeev, A.V. Kryukov // *Director General*. – 2010. – No.11. – pp. 22-27.
6. Executive manufacturing systems – tool for efficient management of engineering enterprise / E.B. Frolov, A.R. Zalygin, A.V. Nesterov // *Director General*. – 2013. – No.2. – pp. 76-79.
7. Timiryazev, V.A., Skhirtladze, A.G., Datsko, A.G. Controlling the Accuracy of Contouring Grooves in the Manufacture of Parts in the Repair Industry. *Steel Transl.* – 2023. – No.53. – pp. 257–261.
8. Datsko A.G., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I.K. Controlling the accuracy in contour milling. *Russian Engineering Research*. – 2021. – T. 41. – № 3. – pp. 262-265.
9. Abbyasov V.M., Samoiloa A.S., Makarov S.V., Baikin D.S., Chunina A.A. Rear axel assembly process structure formation using universal assembly conveyor. *AIP Conference Proceedings. International scientific and practical symposium "Materials science and technology" (MST2021)*. – 2022. – P. 209.

#### References:

1. Solometsev Yu.M., Frolov E.B. "Digital Twin" of Manufacturing System – Promising Tool to Increase Machine Park Effectiveness of Engineering Enterprise. *Machine Park*. 2018;8:36.-39.
2. Solomentsev Yu.M., Zagidullin R.R., Frolov E.B. Planning in Modern Systems of Production Control. *Engineering Technique*. 2010;4:76-81.
3. Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. Modern Methods to Increase Effectiveness of Engineering Enterprises. *Engineering Technique*. 2015;8:54-58.
4. Dolgov V.A., Kabanov A.A. Basic Approaches to Formation of Information Model of Industrial-Processing System of Engineering Enterprise. *Automation. Modern Technologies*. 2018;4:178-184.
5. Frolov E.B., Kryukov V.V., Timofeev D.M., Kryukov A.V. How to Achieve Production "Transparency" or ISO Standards and Industrial Soft at Enterprise. *Director General*. 2010;11:22-27.
6. Frolov E.B., Zalygin A.R., Nesterov A.V. Executive Manufacturing Systems – Tool for Efficient Management of Engineering Enterprise. *Director General*. 2013;2:76-79.
7. Timiryazev V.A., Skhirtladze A.G., Datsko A.G. Controlling the Accuracy of Contouring Grooves in the Manufacture of Parts in the Repair Industry. *Steel in Translation*. 2023;53:257-26.
8. Datsko A.G., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I.K. Controlling the Accuracy in Contour Milling. *Russian Engineering Research*. 2021;41(3):262-265.
9. Abbyasov VM, Samoiloa AS, Makarov SV, Baikin DS, Chunina AA. Rear Axel Assembly Process Structure Formation Using Universal Assembly Conveyor. In: *AIP Conference Proceedings of the International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST2021)*: 2022. p. 209.

10. Бухтеева И.В., Аббясов В.М., Елхов П.Е. Направленный выбор компоновки гибкой автоматизированной линии сборки валов // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 2. – №1 (15). – С. 134-140.
10. Bukhteeva I.V., Abbyasov V.M., Elkhov P.E. Directed Selection of a Configuration of Flexible Automated Assembly Line for Assembling of Gearbox Shafts. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2013;2-1(15):134-140.
11. Ламин И.И. Укрупненный метод проектирования технологических процессов сборки изделий в автостроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 2. – С. 32-36.
11. Lamin I.I. Integrated Design Method of Technological Processes of Assembly in Auto Structure. *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making*. 2014;2:32-36.
12. Zhang X., Zeng J. Joint Optimization of Condition-Based Repair-by-Replacement and Spare Parts Provisioning Policy with Random Maintenance Time and Lead Time. In: Qi E., Shen J., Dou R. (eds) *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015*. Atlantis Press, Paris.
12. Zhang X, Zeng J. Joint Optimization of Condition-Based Repair-by-Replacement and Spare Parts Provisioning Policy With Random Maintenance Time and Lead Time. In: Qi E, Shen J, Dou R, editors. *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*; Atlantis Press, Paris: 2015.
13. Basten R.J.I., Van der Heijden M.C., Schutten J.M.J. et al. An approximate approach for the joint problem of level of repair analysis and spare parts stocking. *Ann Oper Res* 224, 121–145 (2015).
13. Basten RJI, Van der Heijden MC, Schutten JMJ, et al. An Approximate Approach for the Joint Problem of Level of Repair Analysis and Spare Parts Stocking. *Annals of Operations Research*. 2015;224:121-145.
14. Chen N., Ou L., Bai F. (2020) Research on Calculating Method of Repairable Spare Parts and Non-repairable Spare Parts. In: Duan B., Umeda K., Hwang W. (eds) *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 588. Springer, Singapore.
14. Chen N, Ou L, Bai F. Research on Calculating Method of Repairable Spare Parts and Non-Repairable Spare Parts. In: Duan B, Umeda K, Hwang W, editors. *Proceedings of the 7th Asia International Symposium on Mechatronics*. Lecture Notes in Electrical Engineering; Springer, Singapore: 2020, vol. 588.
15. Tan L., Sun C., Pang M., Xiang K., Tang B. Design of Screw Fastening Tool Based on SEA. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019*. Lecture Notes in Computer Science, vol 11740. Springer, Cham.
15. Tan L, Sun C, Pang M, Xiang K, Tang B. Design of Screw Fastening Tool Based on SEA. In: Yu H, Liu J, Liu L., Ju Z, Liu Y, Zhou D, editors. *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham: 2019, vol. 11740.
16. Geda M.W., Kwong C.K., Jiang H. Fastening method selection with simultaneous consideration of product assembly and disassembly from a remanufacturing perspective. *Int J Adv Manuf Technol* 101, 1481–1493 (2019).
16. Geda M.W., Kwong C.K., Jiang H. Fastening Method Selection With Simultaneous Consideration of Product Assembly and Disassembly From a Remanufacturing Perspective. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;101:1481-1493.
17. Tesfay Y.Y. Process Capability Analysis. In: *Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs*. Springer, Cham. 2021
17. Tesfay YY. Process Capability Analysis. In: *Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs*. Springer, Cham; 2021.
18. Xu W., Cheng Q., Yang C. et al. Dynamic analysis and looseness evaluation of bolted connection under vibration of machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*. 2021.
18. Xu W, Cheng Q, Yang C, et al. Dynamic Analysis and Looseness Evaluation of Bolted Connection Under Vibration of Machine Tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021.
19. Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А. Моделирование систем управления организационно-технологическим обеспечением механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 3-4. – С. 58-67.
19. Averchenkova E.E., Shabanov A.A. Modelling of Control Systems for Organizational and Technological Support of Mechanical Assembly at Automotive Cluster Enterprises. *Automation and Modelling in Design and Management*. 2021;3-4:58-67.
20. Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А., Аверченков В.И. Модель и алгоритм управления совокупностью сборочного оборудования системы обеспечения механической сборки // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 1. – С. 43-55.
20. Averchenkova E.E., Shabanov A.A., Averchenkov V.I. Model and Algorithm for Controlling the Assembly Equipment of Mechanical Assembly Supply System. *Automation and Modelling in Design and Management*. 2022;1:43-55.
21. Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А. Методика формирования оптимальной совокупности запасного оборудования в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – №25 (4). – С. 201-219.
21. Averchenkova E.E., Shabanov A.A. The Methodology for Creating the Optimal Set of Spare Equipment in the Organizational and Technological System for Providing Mechanical Assembly at the Enterprises of the Motor-Car Construction Cluster. *Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(4):201-219.

22. Control System of Assembly Production Organizational and Technological System of Automotive Cluster Factories A.A. Shabanov1 and E.E. Averchenkova Published under licence by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 2091, 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2021) 4-7 October 2021, Astrakhan, Russian Federation Citation A A Shabanov and E E Averchenkova 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2091 012057

22. Shabanov AA, Averchenkova EE. Control System of Assembly Production Organizational and Technological System of Automotive Cluster Factories. In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies ICCT-2021; 2021, Oct 4-7; Astrakhan. Journal of Physics Conference Series: 2021, vol. 2091 p. 012057.

### **Информация об авторах:**

#### **Шептунов Сергей Александрович**

доктор технических наук, директор Института конструкторско-технологической информатики Российской Академии Наук, ORCID 0000-0001-7947-9525

#### **Аверченков Андрей Владимирович**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института конструкторско-технологической информатики Российской Академии Наук, ORCID 0000-0003-0196-1332

#### **Аверченкова Елена Эдуардовна**

кандидат технических наук, доцент, кафедры «Цифровая экономика» Брянского государственного технического университета, ORCID 0000-0003-2098-6156

#### **Шабанов Алексей Александрович**

ООО «ЭРГА»

### **Information about the authors:**

#### **Sheptunov Sergey Alexandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, ORCID: 0000-0001-7947-9525

#### **Averchenkov Andrey Vladimirovich**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, ORCID: 0000-0003-0196-1332

#### **Averchenkova Elena Eduardovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of the Digital Economy of Bryansk State Technical University, ORCID: 0000-0003-2098-6156

#### **Shabanov Alexey Alexandrovich**

Erga LLC

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

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

**Статья поступила в редакцию 27.05.2024; одобрена после рецензирования 15.06.2024; принята к публикации 26.06.2024.**

**The article was submitted 27.05.2024; approved after reviewing 15.06.2024; accepted for publication 26.06.2024.**

**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.**



## Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.313.333

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Дмитрий Владленович Дзюин<sup>1✉</sup>, Валерия Валерьевна Дмитриева<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> dziouin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0411-9948>

<sup>2</sup> dm-valeriya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-9380>

**Аннотация.** *Статья посвящена разработке программы расчета параметров T-образной схемы замещения трехфазных асинхронных электродвигателей. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью получения достоверных результатов компьютерного имитационного моделирования систем электропривода в программных комплексах. Целью исследования является реализация в удобном программном интерфейсе аналитической методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с минимальными отклонениями от каталожных данных. Для программного расчета параметров схемы замещения рассматриваются аналитические аппроксимационные и итерационные методики счета, так как они не требуют проведения экспериментов на промышленном электрооборудовании. Выполнен сравнительный анализ таких методик на примере трёхфазного асинхронного двигателя марки VA280S4 мощностью 110 кВт. Результаты сравнительного анализа показывают, что наибольшая достоверность механической и электромеханической характеристики достигается в случае применения итерационной методики счета с минимизацией целевой функции суммы взвешенных квадратов отклонений значений контрольных точек от каталожных данных. Программа расчета параметров схемы замещения по выбранной методике счета реализована в среде Embarcadero Delphi. Рассчитываемые программой достоверные значения параметров электродвигателей позволяют проводить максимально соответствующее реальным объектам компьютерное моделирование систем электропривода.*

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, схема замещения, расчет параметров, программа расчета, итерационная методика, многокритериальный подбор, целевая функция, механическая характеристика, моделирование

**Для цитирования:** Дзюин Д.В., Дмитриева В.В. Разработка программы расчета параметров схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 84-92. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.

Original article

Open Access Article

### DEVELOPING A PROGRAM FOR CALCULATING THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF A THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Dmitry V. Dzyuin<sup>1✉</sup>, Valeriya V. Dmitrieva<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia

<sup>1</sup> dziouin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0411-9948>

<sup>2</sup> dm-valeriya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-9380>

**Abstract.** *The article is devoted to developing a program for calculating the parameters of a T-shaped equivalent circuit of three-phase asynchronous electric motors. The relevance of this work is due to the need to obtain reliable results of computer simulation modelling of electric drive systems in software packages. The aim of the study is to implement in*

*a convenient software interface an analytical technique for calculating the parameters of an asynchronous motor equivalent circuit with minimal deviations from the catalogue data. For the software calculation of the equivalent circuit parameters the paper considers analytical approximation and iterative counting techniques, since they do not require experiments on industrial electrical equipment. A comparative analysis of such techniques is performed using the example of a three-phase asynchronous motor brand BA280S4 with a power of 110 kW. The results of the comparative analysis show that the highest reliability of the mechanical and electromechanical characteristics is achieved in the case of using the iterative counting technique with minimizing the objective function of the sum of the weighted squares of the deviations of the control point values from the catalogue data. The authors implement the program for calculating the equivalent circuit parameters according to the selected calculation method in the Embarcadero Delphi environment. The reliable values of the electric motor parameters calculated by the program will allow for computer to model electric drive systems that best matches real objects.*

**Keywords:** asynchronous electric motor, equivalent circuit, calculation of parameters, calculation program, iterative method, multi-criteria selection, objective function, mechanical characteristic, modelling

**For citation:** Dzyuin D.V., Dmitrieva V.V. Developing a Program for Calculating the Equivalent Circuit Parameters of a Three-Phase Asynchronous Electric Motor. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 84-92. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-84-92.

## Введение

В настоящее время наиболее доступным и дешевым методом синтеза и исследования статических и динамических режимов работы электромеханических систем является компьютерное имитационное моделирование в программных комплексах, как например: ETAP, NI Multisim, MATLAB/Simulink, SimInTech. В связи с тем, что 80 % всей потребляемой в промышленности электрической энергии приходится на асинхронный электропривод [1], возникает актуальная задача наиболее точного приближения параметров математической и компьютерной модели трехфазного асинхронного двигателя (АД) к реальному оборудованию в целях повышения достоверности результатов моделирования.

Производители АД предоставляют информацию о технических характеристиках электрических машин в каталогах выпускаемого оборудования. Однако каталожные данные не содержат соответствующих параметров эквивалентной схемы замещения АД, составление которой требуется для расчета электромеханических переходных процессов [2]. Определение параметров схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя традиционно производится путем стандартных испытаний: измерение сопротивления обмоток постоянному току, измерение сопротивления обмоток на холостом ходу и измерение сопротивлений при заторможенном роторе [1, 3, 4]. Чтобы избежать нарушения режима работы электромеханической системы и не отключать АД от сети и нагрузки, в настоящее время, как свидетельствуют недавние исследования [4 – 8], актуально использование расчетных оптимизационных методов оценки параметров асинхронных машин. Используя предоставленные производителем данные в качестве контрольных точек, авторы работ [4 – 8] осуществляют в реальном времени непрерывное сравнение текущих значений идентифицируемых параметров схемы замещения с адаптивной эталонной моделью, с применением современных алгоритмов нелинейной оптимизации [4], алгоритма вихревого поиска [5], алгоритма роя сальп [6], расширенного наблюдателя Калмана [7] и нейронных сетей [7, 8]. Получаемая в результате оптимизации математическая модель двигателя индивидуальна для каждого объекта исследования и максимально ему соответствует. Но в условиях невозможности проведения тестов на промышленном оборудовании, например, при отсутствии доступа исследователей на производство, для оценки параметров схемы замещения АД требуются совершенно иные, аналитические методы счета с применением ЭВМ. К такому же выводу приходят авторы работ [2, 9].

Соответственно, целью данной работы является реализация в удобном программном интерфейсе аналитической методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с минимальными отклонениями от каталожных данных. В ходе работе выполнен обзор преимуществ и недостатков основных методик расчета параметров схемы замещения АД, проведён их сравнительный анализ на примере асинхронного двигателя марки BA280S4 мощностью 110 кВт, в среде Embarcadero Delphi 11 разработана программа расчета параметров схемы замещения по выбранной итерационной методике.

## Методы расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Математическая и компьютерная модель АД строится по уравнениям для Г-образной (рис. 1) или Т-образной схемы замещения (рис. 2) обобщенной двухфазной электрической машины, приведённой к ортогональным осям. Моделируемая электрическая цепь АД характеризуется следующими электрическими и механическими величинами, обозначенными на рис. 1 и рис. 2:  $\dot{I}_1$  – комплексная величина тока в фазе обмотки статора;  $\dot{I}'_2$  – комплексная величина приведенного тока в фазе обмотки ротора;  $\dot{I}_0$  – комплексная величина тока в ветви намагничивания;  $\dot{U}_1$  – комплексная величина фазного напряжения, приложенного к обмотке статора;  $s$  – скольжение асинхронного двигателя.

Рассчитываемые параметры схемы замещения – это активные и индуктивные сопротивления обмоток, обозначенные на рис. 1 и рис. 2:  $R_1$  – номинальное активное сопротивление статора;  $X_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния статора;  $R'_1$  – приведенное активное сопротивление статора;  $X'_1$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния статора;  $R'_2$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $X'_2$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора;  $R_0$  – номинальное активное сопротивление намагничивания (опционально);  $X_0$  – номинальное индуктивное сопротивление намагничивания.

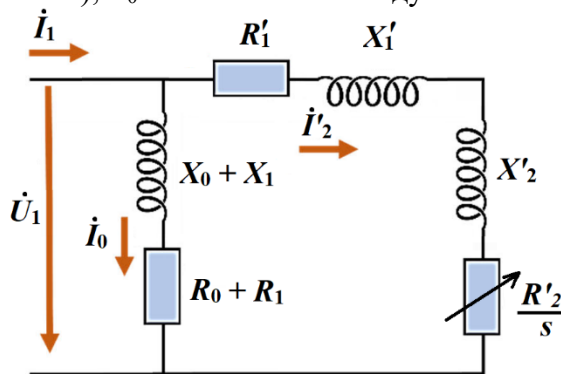


Рис. 1. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 1. L-shaped asynchronous motor equivalent circuit

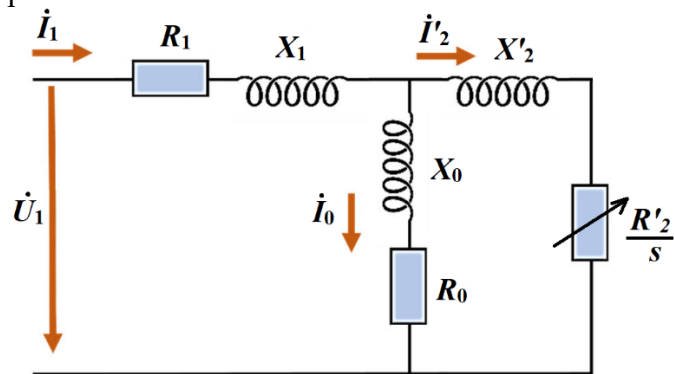


Рис. 2. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 2. T-shaped asynchronous motor equivalent circuit

В библиотеках большинства программных комплексов в структуре готовых блоков моделей АД используется именно Т-образная схема замещения. Поэтому в работе рассматриваются методики расчета значений активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора, ротора и ветви намагничивания только на основании Т-образной схемы замещения.

Исходными данными для расчета параметров схемы замещения по любой методике обязательно являются номинальные параметры, приводимые в паспорте: номинальная мощность  $P_n$ , номинальное линейное напряжение  $U_n$ , номинальный ток статора  $I_n$ , номинальная скорость  $n_n$ , номинальный коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta_n$ , номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_n$ , а также кратность пускового тока  $i_n$ , кратность пускового момента  $m_n$ , кратность критического момента  $m_k$ . Значения этих параметров дают достоверную информацию о трёх точках механической и электромеханической характеристики АД: номинальный режим (при номинальном скольжении  $s_n$ ), пусковой режим (при скольжении  $s = 1$ ), режим максимального момента (при критическом скольжении  $s_k$ ). В условиях отсутствия информации о эталонных значениях сопротивлений схемы замещения, степень адекватности их вычисления может быть оценена только по близости значений тока, момента, КПД и  $\cos \varphi$  к паспортным данным, для чего выполняется расчет механической и электромеханической характеристики АД по полученной схеме замещения. Задача вычисления 5...6 параметров схемы замещения АД по трём точкам механической характеристики не имеет однозначного решения, отсюда следует несколько подходов к вычислению, и все они основаны на ряде допущений.

Одна группа аналитических методов, представленных в статьях Сафаряна В.С. [9], Макеева М.С. [10], Мощинского Ю.А. [11], Осипова В.С. [12], относится к безитерационным аппроксимационным. Данные методики отличаются последовательностью, простотой и быстротой счета, в случае необходимости расчет может быть выполнен вручную с использованием только калькулятора. Недостатком перечисленных методик является то, что аппроксимация

функции сопротивления цепи ротора в зависимости от скольжения требует дополнительных значений величин, отличных от паспортных данных для номинального режима. Такими данными выступают ток холостого хода [10], энергетические показатели (КПД и  $\cos \varphi$ ) при загрузке 25 %, 50 %, 75 %, 80 % или 125 % номинальной [11], механические, магнитные и добавочные потери [12]. Все вышеперечисленные значения чаще всего задаются произвольно, как, например, активное сопротивление ротора [9]. Эти допущения приводят к расхождениям при аппроксимации характеристик и к значительным отклонениям расчетных значений параметров от каталожных. Как показано в [13], наибольшей точностью аппроксимации отличается методика Ю.А. Мощинского, в которой приводятся зависимости активного и индуктивного сопротивления ротора от скольжения  $R'_2(s)$ ,  $X'_2(s)$  с учетом эффекта вытеснения тока. Номинальные значения сопротивлений ротора достигаются в момент пуска при единичном скольжении:  $R'_2(1) = R'_{20}$ ,  $X'_2(1) = X'_{20}$ .

Для подбора параметров в широком диапазоне значений применяются итерационные методы вычисления, такие, как методика С.Г. Германа-Галкина [14], В.Б. Терёхина [15], А.А. Усольцева и Д.В. Лукичёва [16]. В приведённых методиках значения активных и реактивных сопротивлений статора и ротора вычисляются с использованием коэффициента  $c_1$ , являющегося коэффициентом пропорциональности индуктивностей обмотки статора и ветви намагничивания:

$$c_1 = 1 + \frac{X_1}{X_0}. \quad (1)$$

Вычисления параметров схемы замещения производятся в диапазоне  $1,02 < c_1 < 1,2$ , и на каждой итерации значение  $c_1$  по формуле (1) сравнивается с исходным. Для сокращения числа итераций, как предложено в [15, 16], рассчитанное значение  $c_1$  становится исходным для следующей итерации. Такой расчет сходится за 3...4 итерации, но получаемые по схеме замещения значения контрольных параметров обычно сильно отклоняются от каталожных данных, особенно в области скольжений, превышающих критическое.

Подбор параметров схемы замещения АД для совпадения расчетной характеристики со всеми контрольными точками является задачей многокритериальной нелинейной оптимизации, поэтому к её решению применим подход, представленный в [17]. В данной методике, помимо активных и индуктивных сопротивлений статора, ротора и ветви намагничивания, оценке подлежат ещё три параметра АД:  $a$  – доля магнитных потерь ротора;  $h'$  – приведенная глубина паза ротора;  $\alpha$  – доля неактивной части обмотки ротора. Начальные приближения всех 9 параметров определяются по классическим формулам для Т-образной схемы замещения [17]. Итерационный подбор выполняется методом покоординатного спуска, при котором значение каждого из 9 параметров изменяется в  $(1 \pm \Delta)$  раз в большую и в меньшую сторону, где  $\Delta$  – точность счёта, по умолчанию принимаемая  $\Delta = 0,005$ . Для каждого изменённого значения параметра при всех неизменных остальных вычисляется вектор критериев (контрольных точек) – значения номинального и пускового момента и тока, критического момента, КПД и коэффициента мощности в относительных единицах (о.е.):

$$A = [m_n; i_n; m_p; i_p; m_k; \eta_n; \cos \varphi_n]. \quad (2)$$

Из вектора критериев (2) на каждой итерации формируется и сохраняется в матрице обций критерий оптимизации – целевая функция. В качестве целевой функции выступает аддитивная свертка взвешенных квадратов отклонений значений контрольных точек от каталожных данных:

$$F(A) = \sum_{i=1}^7 v_i \left( \frac{A_{ni} - A_i}{A_{ni}} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (3)$$

где  $v_i$ , о.е. – вес  $i$ -го критерия;  $A_{ni}$ ,  $A_i$ , о.е. – каталожное и текущее значение  $i$ -го контрольного параметра АД из (2).

Из полученной матрицы критериев (значений минимизируемой целевой функции) выбирается наименьшее значение, и соответствующее ему изменённое значение параметра схемы замещения сохраняется, заменяя собой исходное. На этом завершается одна итерация, и далее начинается следующая. Расчет останавливается, когда минимизируемая целевая функция (3) перестаёт уменьшаться, т.е. на текущей итерации нет улучшений.

Если в процессе подбора параметров какой-либо из них выходит за границы ограничений:  $0 < R_1$ ;  $0 < X_1$ ;  $0,05X_0 < R_0 < 0,2X_0$ ;  $0 < X_0 < 1000X_1$ ;  $0 < c_1 < 1000X'_{20}$ ;  $0 < R'_{2(s)}$ ;  $0 < X'_{2(s)}$ ;  $0,2 < a < 0,8$ ;  $0,005 < \alpha < 0,2$ ;  $1 < h' < 7$ ; то соответствующее ему значение целевой функции (3) в матрице критериев приравнивается к  $10^6$ , что практически соответствует бесконечности [17].

### Результаты работы и их обсуждение

Итерационная методика многокритериальной оптимизации параметров схемы замещения АД [17] реализована в программной среде Embarcadero Delphi [18]. Блок-схема её алгоритма приведена на рис. 3.

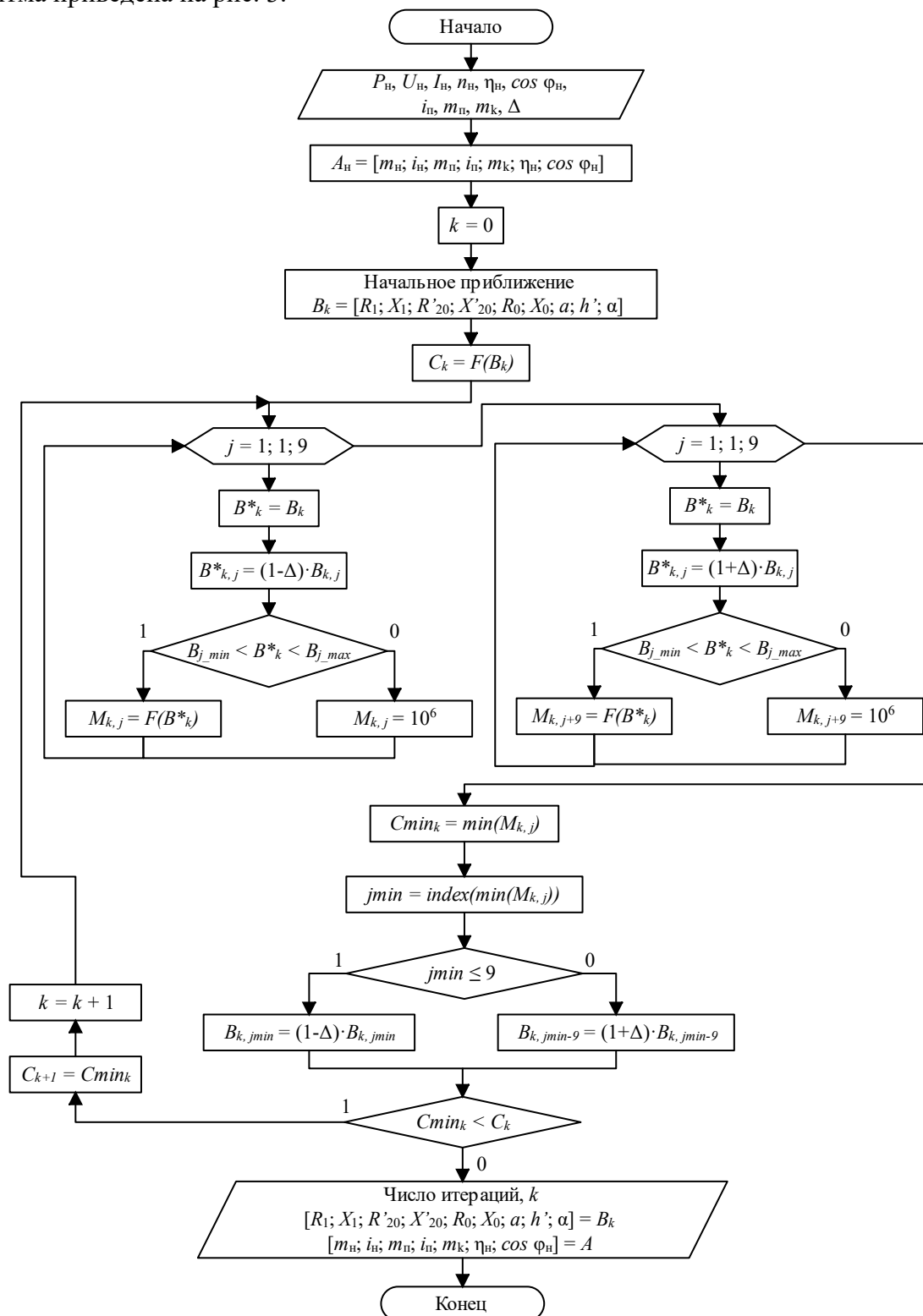


Рис. 3. Блок-схема алгоритма разработанной программы  
Fig. 3. Block diagram of the algorithm for the developed program

Результаты работы программы показали, что используемая методика, благодаря учёту активного сопротивления ветви намагничивания и эффекта вытеснения тока в роторе, отличается наибольшим количеством совпадений с каталожными данными. Для примера асинхронного двигателя марки BA280S4 мощностью 110 кВт в табл. 1 представлены результаты программного расчёта сопротивлений схемы замещения АД в сравнении с результатами расчета по методикам Мощинского Ю.А., Германа-Галкина С.Г., Терёхина В.Б., Усольцева А.А.

Таблица 1

**Расчетные значения сопротивлений схемы замещения асинхронного двигателя BA280S4**

Table 1

*Calculated values of the BA280S4 asynchronous motor equivalent circuit resistances*

Методика	$R_1$ , Ом	$R'_{20}$ , Ом	$X_1$ , Ом	$X'_{20}$ , Ом	$X_0$ , Ом	$R_0$ , Ом
Многокритериальная	0,057698	0,010811	0,081539	0,140675	3,283204	0,164457
Мощинский Ю.А. и др. [11]	0,030319	0,012625	0,123251	0,170204	3,467416	-
Герман-Галкин С.Г. [14]	0,023253	0,009213	0,041623	0,041623	2,173841	-
Терёхин В.Б. [15]	0,011843	0,046936	0,079600	0,079600	4,562045	-
Усольцев А.А. и др. [16]	0,010948	0,010948	0,177112	0,088562	3,413093	-

Расчитанные значения контрольных параметров АД BA280S4 и их максимальные и минимальные относительные отклонения от каталога сведены в табл. 2.

Таблица 2

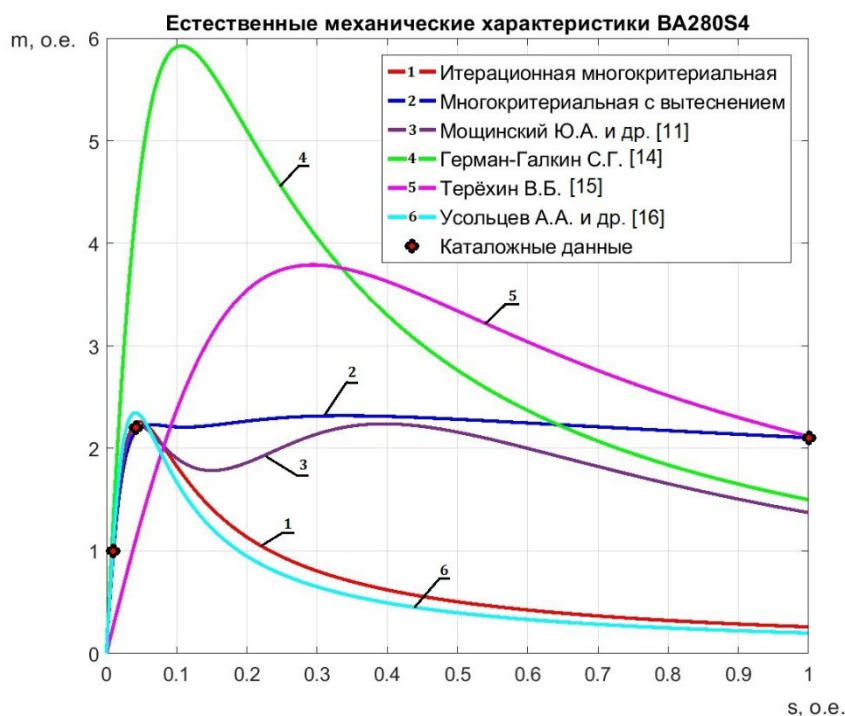
**Значения контрольных параметров асинхронного двигателя BA280S4 и их относительные отклонения от каталога**

Table 2

*Values of the BA280S4 asynchronous motor check parameters and their deviations from the catalog*

Методика\Параметр	$m_n$ , о.е.	$i_n$ , о.е.	$m_k$ , о.е.	$i_n$ , о.е.	$m_k$ , о.е.	$\eta_n$ , о.е.	$\cos \Phi_n$ , о.е.
Каталожные значения	1	1	2,1	6,4	2,2	0,951	0,87
Итерационная многокритериальная	1,0433	1,0468	0,2598	4,9800	2,2616	0,9280	0,8886
Многокритериальная с учетом вытеснения тока	0,9927	1,0098	2,1195	6,2812	2,2181	0,9149	0,8891
Мощинский Ю.А. и др. [11]	1,0254	1,0285	1,3737	6,2080	2,2206	0,9633	0,8563
Герман-Галкин С.Г. [14]	1,3315	1,2848	1,4996	12,6131	5,9239	0,9595	0,8936
Терёхин В.Б. [15]	0,2752	0,3341	2,1198	6,6200	3,7893	0,9848	0,6920
Усольцев А.А. и др. [16]	1,1002	1,0671	0,2002	4,3759	2,3471	0,9778	0,8724
Мин. отклонение $\varepsilon_{min}$ , о.е.	0,0073	0,0098	0,0093	0,0186	0,0082	0,0089	0,0028
Макс. отклонение $\varepsilon_{max}$ , о.е.	0,7248	0,6659	0,9047	0,9708	1,6927	0,0380	0,2046

Полученные результаты (выделенные темно-серым цветом) подтверждают, что используемая в программе итерационная многокритериальная методика с учетом вытеснением тока отличается приемлемой точностью счета: расхождение для двигателей средней мощности не превышает 2 % для механических и электромеханических характеристик и достигает максимум 4 % для энергетических характеристик (КПД), что укладывается в допустимый заводской разброс характеристик, равный 5 %. Как иллюстрируют приведённые на рис. 4 естественные механические характеристики, построенные для примера BA280S4, расчёт по программе [18] даёт полное совпадение всех трёх точек номинального, пускового и критического режима, в то время как остальные рассмотренные методики позволяют достичь совпадения только одной или двух контрольных точек.



**Рис. 4. Естественные механические характеристики асинхронного двигателя BA280S4**  
**Fig. 4. Natural mechanic characteristics of the BA280S4 asynchronous motor**

### Заключение

Разработанная компьютерная программа объемом 16 МБ – это новый, удобный инструмент, совместимый с любой 32-битной и 64-битной версией Windows, не имеющий особых требований к процессору и оперативной памяти. Программа осуществляет вывод исходных данных и результатов расчета (параметров схемы замещения, контрольных точек и относительных отклонений) в текстовые поля, в файл и на график механической характеристики.

Программа может применяться: для расчета параметров двигателей в условиях отсутствия доступа к промышленному оборудованию в целях верификации; для разработки продвинутых компьютерных моделей трехфазных асинхронных двигателей с динамическими постоянными времени ротора; для составления каталогов исходных данных по двигателям для расчетно-графических и контрольных работ; для расчета недостающих и точных значений сопротивлений обмоток в целях построения достоверных естественных и искусственных механических характеристик при исследовании регулирования асинхронных двигателей. Быстрота и доступность расчетов с помощью разработанной программы обеспечит наибольшую достоверность математического и компьютерного моделирования систем электропривода для решения учебно-методических и научно-исследовательских задач.

### Список источников:

1. Khalaf M. M., Ali A. M. Parameters Estimation Tests of Induction Machine Using Matlab/Simulink. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021;1973(1):012109.
2. Gör H. Feasibility of Six Metaheuristic Solutions for Estimating Induction Motor Reactance. Mathematics. 2024; 12(3):483.
3. Ершов М.С., Комков А.Н., Гамидов О.М. Определение параметров схемы замещения и основных характеристик короткозамкнутых асинхронных двигателей малой мощности на основе анализа сигналов тока и напряжения // Электротехника. – 2022. – № 2. – С. 63-68.

### References:

1. Khalaf M.M., Ali A.M. Parameters Estimation Tests of Induction Machine Using Matlab/Simulink. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021;1973(1):012109.
2. Gör H. Feasibility of Six Metaheuristic Solutions for Estimating Induction Motor Reactance. Mathematics. 2024;12(3):483.
3. Ershov M.S., Komkov A.N., Gamidov O.M. Determination of the Equivalent-Circuit Parameters and the Main Characteristics of Squirrel-Cage Low-Power Induction Motors Based on Analysis of Current and Voltage Signals. Electrical Engineering. 2022;2:63-68.



4. Simba K.G., Quilumba F.L., Granda N.V. Parameter Estimation of a Three-Phase Induction Motor from Direct Starting Stator Transient Measurements. 2020 IEEE ANDESCON, Quito, Ecuador. IEEE, 2020. Pp. 1-5.
5. Montano J., Garzón O.D., Herrera-Jaramillo D.A., Montoya O.D., Andrade F., Tobón A. Estimating the Parameters of a Three-Phase Induction Motor using the Vortex Search Algorithm. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2023;48:337-347.
6. Zorig A., Belkheiri A., Bendjedia B., Kouzi K., Belkheiri M. New identification of induction machine parameters with a meta-heuristic algorithm based on least squares method. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2023;42(6):1852-1866.
7. Tang J., Yang Y., Blaabjerg F., Chen J., Diao L., Liu Z. Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. Energies. 2018;11(9):2194.
8. Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б. Идентификация параметров схемы замещения асинхронных двигателей при помощи нейронных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – № 4. – С. 31-44.
9. Сафарян В.С., Геворгян С.Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 6. – С. 20-34.
10. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – №1 (23). – С. 108-112.
11. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38-42.
12. Осипов В.С. Аналитический метод расчета параметров схемы замещения трехфазных асинхронных двигателей серии АИР // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – №2 (54). – С. 108-120.
13. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н. Обоснование параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13. – № 4(67). – С. 129-138.
14. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учеб. пособие для вузов / С.Г. Герман-Галкин. Санкт-Петербург: КОРОНА Век, 2008. – 368 с.
15. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
16. Усольцев А.А., Лукичёв Д.В. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Приборостроение. – 2008. – №10. – С. 35-41.
4. Simba KG, Quilumba FL, Granda NV. Parameter Estimation of a Three-Phase Induction Motor From Direct Starting Stator Transient Measurements. In: Proceedings of 2020 IEEE ANDESCON; Quito, Ecuador: IEEE: 2020. p. 1-5.
5. Montano J., Garzón O.D., Herrera-Jaramillo D.A., Montoya O.D., Andrade F., Tobón A. Estimating the Parameters of a Three-Phase Induction Motor Using the Vortex Search Algorithm. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2023;48:337-347.
6. Zorig A., Belkheiri A., Bendjedia B., Kouzi K., Belkheiri M. New Identification of Induction Machine Parameters With a Meta-Heuristic Algorithm Based on Least Squares Method. COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2023;42(6):1852-1866.
7. Tang J., Yang Y., Blaabjerg F., Chen J., Diao L., Liu Z. Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. Energies. 2018;11(9):2194.
8. Omelchenko E.Ya., Lyman A.B. Identification of the Parameters of an Induction Motor Equipment Circuit Using Neural Networks. Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2023;19(4):31-44.
9. Safaryan V.S., Gevorgyan S.G. Ascertainment of the Equivalent Circuit Parameters of the Asynchronous Machine. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2015;6:20-34.
10. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. Algorithm for Calculating the Parameters of the Equivalent Circuit of the Asynchronous Engine at the Catalogue Data. Science Vector of Togliatti State University. 2013;1(23):108-112.
11. Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. Determining the Asynchronous Motor Equivalent Circuit From the Catalogue Data. Electricity. 1998;4:38-42.
12. Osipov V.S. Analytical Calculation of Equivalent Circuit Parameters for Three Phase Asynchronous Motors of AIR-Series. Vestnik of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2017;2(54):108-120.
13. Pilyaev S.N., Afonichev D.N. Substantiation of Parameters of the Asynchronous Electric Motor Replacement Circuit. Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2020;13-4(67):129-138.
14. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Design of Mechatronic Systems on a PC. Saint Petersburg: KORONA Vek; 2008.
15. Terekhin V.B. Simulating Electric Drive Systems in Simulink (Matlab 7.0.1). Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2008.
16. Usoltsev A.A., Lukichev D.V. Definition of Parameters of Model of the Asynchronous Engine on the Help Data. Journal of Instrument Engineering. 2008;10:35-41.

17. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: Недра, 2010. – 318 с.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611993 Российская Федерация. Программа расчета параметров Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя : № 2024611028 : заявл. 22.01.2024 : опубл. 26.01.2024 / Д. В. Дзюин.

### Информация об авторах:

#### Дзюин Дмитрий Владленович

аспирант, ассистент кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Author-ID-РИНЦ 1190013

#### Дмитриева Валерия Валерьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Scopus-Author ID 56007868500, Author-ID-РИНЦ 312404

17. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Stability of the Industrial Electrical Systems. Moscow: Nedra; 2010.

18. Dzyuin D.V. Program for Calculating the Parameters of a T-shaped Equivalent Circuit of a Three-Phase Asynchronous Electric Motor. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia. No. 2024611993; 2024 Jan 26.

### Information about the authors:

#### Dzyuin Dmitry Vladlenovich

Postgraduate student, Assistant at the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Author-ID-RSCI: 1190013.

#### Dmitrieva Valeria Valerievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Scopus-Author ID: 56007868500, Author-ID-RSCI: 312404

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

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

**Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 26.06.2024.**

**The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 26.06.2024.**

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

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

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

*Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченко.*

Сдано в набор 15.09.2024. Выход в свет 30.09.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,7.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

