

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ



## В проектировании и управлении

Издается с 2018 года

№ 2(28) 2025

DOI:10.30987/issn.2658-3488

### ЕЖЕКАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

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

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

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

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

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

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

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

#### Редколлегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### Адрес редакции:

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

тел.: (4832) 56-49-90

[www.aimpu.ru](http://www.aimpu.ru)

E-mail: aim-pu@mail.ru

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

Журнал распространяется по подписке:

индекс Э80855 по интернет-каталогу

"Пресса по подписке".

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

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

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

# AUTOMATION AND MODELING

SCIENTIFIC TECHNICAL  
JOURNAL



## in design and management

Issued since 2018

№ 2(28) 2025

DOI:10.30987/issn.2658-3488

### QUARTERLY SCIENTIFIC JOURNAL

The founder of the publication – the Federal state budgetary educational  
institution of higher education  
«Bryansk State Technical University» (BSTU)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*(St. Petersburg)*

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

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

#### *Editorial board*

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

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

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

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

The Journal is registered by the Federal  
Service for Supervision in the Sphere of Telecom,  
Information Technologies and Mass Communications  
of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).  
Registration certificate ПИ № ФС77-73192 of July 2, 2018

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*www.aimpu.ru*

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

ISSN print: 2658-3488

ISSN online: 2658-6436

The magazine is distributed by subscription:  
index 380855 in the online catalog "Subscription Press".

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

**Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef**

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

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

**Каширская Е.Н.** Динамика формообразования детали при круглом шлифовании

**Третьяков В.М.** Инструменты разработки конструкций изделий машиностроения

**Фролов И.А., Тарасов Д.В., Воротников А.А.,  
Подураев Ю.В.** Методика испытания осей медицинских роботов посредством многофакторных испытаний с использованием инерционного стенда

## Математическое и компьютерное моделирование

**Биткина Е.Е., Шимохин А.В., Николаева Е.В.** Моделирование процесса проектирования деталей, изготавляемых методом аддитивных технологий, с помощью создания имитационной модели изделия

**Реутов А.А.** Моделирование аварийной работы вариатора коробки передач автомобиля

**Широченко В.А., Скрылев Н.П., Недюхин В.А.** Особенности оптимизации промышленного производства на основе математического программирования

## Управление в организационных системах

**Кривошеев Д.А., Блинова Д.В.** Формализация процедуры синхронизации геопространственных данных и цифровых информационных моделей

**Кузнецова Н.М., Карлова Т.В.** Рационализация распределения задач бизнес-процессов между работниками транспортного предприятия с учетом аспектов информационной безопасности

**Онуфриева Т.А., Борсук Н.А.** Разработка и внедрение специализированной библиотечной системы для слабовидящих людей

**Юдин Д.В., Феофанов А.Н.** Моделирование функционального состава автоматизированной системы выбора метода обработки и режущего инструмента

# CONTENTS

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

4 **Kashirskaya E.N.** Dynamics of Part Form Shaping During Cylindrical Grinding  
12 **Tretyakov V.M.** Tools for Developing Mechanical Engineering Product Design  
26 **Frolov I.A., Tarasov D.V., Vorotnikov A.A.,  
Poduraev Yu.V.** Methodology for Testing Medical Robot Axes Using Multifactorial Tests with an Inertial Test Bench.

## Mathematical and computer modeling

35 **Bitkina E.E., Shimokhin A.V., Nikolaeva E.V.** Simulating the Design Process for Parts Manufactured Using Additive Technologies Through Creating an Imitation Product Model  
45 **Reutov A.A.** Simulation of Emergency Operation of Vehicle Gearbox Variator  
55 **Shirochenko V.A., Skrylev N.P., Nedyukhin V.A.** Features of Industrial Production Optimization Based on Mathematical Programming

## Management in organizational systems

65 **Krivosheev D.A., Blinova D.V.** Formalization of Geospatial Data and Digital Informational Model Synchronization Procedure  
74 **Kuznetsova N.M., Karlova T.V.** Rationalizing Business Process Task Distribution Among a Transport Enterprise's Employees Considering Information Security Aspects  
83 **Onufrieva T.A., Borsuk N.A.** Developing and Implementing a Specialized Library System for Visually Impaired Individuals  
91 **Yudin D.V., Feofanov A.N.** Modelling Functional Composition of an Automated System for Selecting Machining Method and Cutting Tool

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.923

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-4-11

### ДИНАМИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛИ ПРИ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ

Елизавета Натановна Каширская

РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

liza.kashirskaya@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2108-8462>

**Аннотация.** Исследованы особенности динамики формообразования при круглом наружном шлифовании с учетом соотношения скоростей шлифовального круга и движения подачи абразивного инструмента. Выполнена оценка образующейся погрешности обработанной поверхности детали. Разработаны математические зависимости для расчета основных параметров формообразования. Проведен анализ влияния соотношения скоростей на динамику процесса шлифования. Полученные результаты позволяют прогнозировать качество обрабатываемой поверхности и оптимизировать режимы резания при круглом шлифовании.

**Ключевые слова:** круглое шлифование, производящие линии, формообразование поверхности, моделирование

**Для цитирования:** Каширская Е.Н. Динамика формообразования детали при круглом шлифовании // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-4-11.

Original article

Open Access Article

### DYNAMICS OF PART FORM SHAPING DURING CYLINDRICAL GRINDING

Elizaveta N. Kashirskaya

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

liza.kashirskaya@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2108-8462>

**Abstract.** The paper studies the dynamics features of form shaping in external cylindrical grinding taking into account the speed ratio of the grinding wheel and the feed movement of the abrasive tool; assesses the resulting errors on the processed surface of the part. The work develops mathematical dependencies for calculating the main parameters of form shaping; analyses the influence of speed ratios on the dynamics of the grinding process. The obtained results allow predicting the quality of the machined surface and optimizing cutting modes during cylindrical grinding.

**Keywords:** cylindrical grinding, generating lines, surface form shaping, modelling

**For citation:** Kashirskaya E.N. Dynamics of Part Form Shaping During Cylindrical Grinding. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 4-11. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-4-11.

#### Введение

В современных условиях развития машиностроения особую актуальность приобретают вопросы повышения эффективности процессов механической обработки деталей. Среди различных методов финишной обработки особое место занимает круглое шлифование, которое обеспечивает высокую точность и качество поверхности готовых изделий.

Формообразование поверхности детали при круглом шлифовании представляет собой сложный физико-технологический процесс, где взаимодействуют множество факторов: геометрия и состояние абразивного инструмента, режимы резания, физико-механические свойства обрабатываемого материала, смазочно-охлаждающая жидкость и др. Понимание динамики этого процесса является ключевым для оптимизации режимов обработки и получения требуемых характеристик детали.

Актуальность исследования процесса формообразования заключается в возможности повышения эффективности процесса шлифования за счет оптимизации режимов обработки и улучшения качества готовых деталей. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании технологических процессов механической обработки и модернизации шлифовального оборудования.

Несмотря на значительное количество исследований в данной области, многие аспекты динамики формообразования при круглом шлифовании остаются недостаточно изученными. В частности, требуют дальнейшего исследования закономерности образования геометрии поверхности заготовки.

Целью данной работы является комплексное исследование формообразования поверхности детали при круглом шлифовании с учетом взаимосвязанных факторов процесса и разработка рекомендаций по оптимизации режимов резания. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать существующие теоретические и экспериментальные исследования, разработать методику исследования динамики процесса, формообразования поверхности детали при круглом шлифовании и сделать обоснованное научное заключение об оптимизации процесса шлифования на основе выбора режимов резания.

### **Методика исследования формирования поверхности детали**

Идеализированное представление о круглом шлифовании предполагает образование в результате обработки поверхности прямого кругового цилиндра. Однако наличие тепловых и упругих деформаций технологической системы, возмущений от неуравновешенности, погрешностей формы и эксцентричности вращающихся частей станка приводят к колебаниям текущего радиуса заготовки или шлифовального круга. Это вызывает искажение идеального процесса формообразования поверхности детали, ведущее к возникновению погрешности вследствие изменения мгновенного положения линии контакта шлифовального круга и заготовки. Таким образом, возникают колебания инструмента относительно заготовки, влияющие на истинный характер формообразования поверхности детали.

Характер процесса формообразования детали определяется соотношением между параметрами режима резания и параметрами относительных колебаний инструмента и заготовки [1, 2].

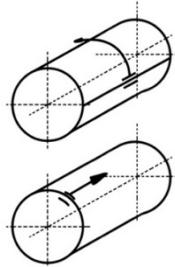
Особый интерес представляет исследование высокоскоростного шлифования, осуществляемого при скоростях резания  $V = 60...250$  м/с и при скорости подачи  $V_s$ , изменяющейся от 750 мм/мин до 250 м/с. Отношение этих скоростей  $q$  составляет огромный диапазон:

$$q = \frac{V}{V_s} = 0,2 \dots 20000.$$

Образование цилиндрической поверхности при круглом шлифовании можно рассматривать двояко. Традиционный подход вытекает из классического определения цилиндрической поверхности, как формирующейся прямолинейной образующей при ее параллельном самой себе движении по круговой направляющей. Это справедливо при врезном шлифовании. Но если мы будем рассматривать динамику формообразования при продольном шлифовании, то нам придется переформулировать определение цилиндрической поверхности,

как формирующейся при движении круговой образующей вдоль прямолинейной направляющей.

Процесс формообразования поверхности детали в идеальном случае не искажается. Цилиндрическая поверхность, в силу обратимости производящих линий, формируется движением прямолинейной образующей по круговой направляющей или движением круговой образующей по прямолинейной направляющей (рис. 1).



**Рис. 1. Идеализированное формообразование**  
*Fig. 1. Idealized shaping*

Если производящая линия не имеет искажений, то и поверхность детали получается неискаженной. Такой подход является идеализированным и не позволяет оценить характер и величину возможных погрешностей обработки.

Исследованием динамики формообразования и ее влиянием на точность изделия занимаются многие ученые. Работы [3, 4] посвящены конкретно исследованию точности процесса круглого шлифования. Авторы статьи [5] включили в рассмотрение учет колебаний металлорежущего станка, перейдя, таким образом, из статической постановки задачи исследования к динамической. Учет колебательного процесса приближает исследователя к возможности прогнозирования погрешностей обработки. Общим вопросам моделирования процесса шлифования посвящена статья [6]. Данные работы представляют собой фундаментальную базу для дальнейшего развития теории и практики шлифования, а также могут быть использованы при разработке новых технологических процессов и модернизации существующего оборудования.

В настоящей работе используется принципиально иной подход – рассмотрение образования отклонений от точности на основе учета относительных колебаний инструмента и заготовки.

### Формирование поперечной погрешности детали

Круговая производящая линия поверхности детали формируется в течение одного оборота заготовки за время:

$$\tau = \frac{1}{n}, \text{ с},$$

где  $n$  – частота вращения заготовки, Гц.

Колебания шлифовального круга относительно заготовки, период которых больше времени формирования круговой производящей линии, не могут привести к её искажению, так как период колебаний связан с частотой колебаний соотношением:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ с},$$

где  $\omega$  – частота относительных колебаний шлифовального круга и заготовки,  $\text{с}^{-1}$ , а диапазон частот колебаний, не искажающих поперечную геометрию детали, выражается неравенством  $\omega < 2\pi n$ .

Значение скорости круговой подачи заготовки выражается зависимостью:  $V_{S_{kp}} = 2\pi lr$ , м/с, где  $r$  – радиус заготовки, м, поэтому условие неискажения поперечного профиля детали принимает вид  $q < \frac{V}{\omega r}$  и является тем значением отношения скорости резания к скорости круговой подачи, к которому нужно стремиться, назначая режимы резания. Оно зависит от радиуса обрабатываемой заготовки и от частоты её колебаний относительно шлифовального круга. Работа с таким отношением скоростей, позволяющим получать неискажённый профиль поперечного сечения детали, не всегда возможна, поэтому имеет смысл рассмотреть возникновение и развитие поперечных погрешностей при больших значениях  $q$ .

При частотах относительных колебаний  $\omega \geq 2\pi n$  возникает и растет овальность поперечного профиля детали, достигая своего максимума – удвоенной амплитуды колебаний – при  $\omega = 4\pi n$ , так как именно при этой частоте период колебаний становится вдвое меньше времени формирования круговой образующей линии. Таким образом, овальность формируется в диапазоне  $2\pi n \leq \omega < 4\pi n$ , что соответствует изменению отношения скоростей в пределах:

$$\frac{V}{\omega r} \leq q < \frac{2V}{\omega r}.$$

В этом диапазоне величина поперечной погрешности  $\Delta_{\text{поп}}$ , вызванной наложением на поперечный профиль заготовки синусоидальной колебательной волны, носит синусоидальный характер и определяется из следующих условий:

$$\begin{aligned} \text{при } q = \frac{V}{\omega r}, \quad \Delta_{\text{поп}} &= 0, \\ \text{при } q = \frac{2V}{\omega r}, \quad \Delta_{\text{поп}} &= \Delta_{\text{max}} = 2A, \text{ мкм}, \end{aligned}$$

где  $A$  – амплитуда относительных колебаний, мкм.

Отсюда выводится зависимость для величины поперечной погрешности детали:

$$\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin \frac{\pi}{2} \left( \frac{\omega r}{V} q - 1 \right).$$

При частотах колебаний  $4\pi n \leq \omega < 30\pi n$  развивается огранка (до пятнадцати волн по окружности), величина которой равна удвоенной амплитуде колебаний. Этот диапазон соответствует изменению отношения скоростей в границах  $\frac{2V}{\omega r} \leq q < \frac{15V}{\omega r}$ .

Погрешности поперечной геометрии, имеющие более пятнадцати волн по длине окружности, относятся к разряду волнистости и наблюдаются при  $q \geq \frac{15V}{\omega r}$ .

При дальнейшем увеличении отношения скоростей  $q$  начинает действовать известный механизм самоперерезания волн на поверхности детали, приводящий к уменьшению погрешности обработки. Это явление наблюдается, когда кривизна траектории относительных колебаний инструмента и заготовки превышает кривизну зоны резания, равную сумме кривизны шлифовального круга и заготовки. Отсюда выводится значение  $q$ , при котором начинается самоперерезание волн:  $q = \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ . Вычислительный эксперимент дал приближенную зависимость для величины погрешности в этом диапазоне скоростей  $\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ , которая расходится с реальными экспериментальными данными не более, чем на 2 % [1].

Проведённое исследование позволяет описать характеристику образования погрешностей поперечной геометрии детали посредством построения динамической характеристики процесса.

1. При соотношении скоростей главного движения резания (линейной скорости вращения круга) и движения подачи от  $q = \frac{V}{V_s} = 0$  до  $q = \frac{V}{\omega r}$  погрешность отсутствует, но может формироваться эксцентризитет поперечного сечения детали. При этом значение поперечной погрешности  $\Delta_{\text{поп}} = 0$ .

2. При  $\frac{V}{\omega r} < q < \frac{2V}{\omega r}$  образуется овальность, а величина поперечной погрешности определяется зависимостью  $\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin \frac{\pi}{2} \left( \frac{\omega r}{V} q - 1 \right)$ .

3. При  $\frac{2V}{\omega r} < q < \frac{15V}{\omega r}$  образуется отклонение формы в виде огранки, а величина поперечной погрешности достигает своего максимума:  $\Delta_{\text{поп}} = 2A$ .

4. Дальнейший рост отношения частот в диапазоне  $\frac{15V}{\omega r} < q < \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$  вызывает волнистость на обработанной поверхности с прежней величиной  $\Delta_{\text{поп}} = 2A$ .

5. И, наконец, при неограниченном росте соотношения часто  $\frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} < q < \infty$  волнистость уменьшается вследствие самоперерезания волн и может быть рассчитана по формуле  $\Delta_{\text{поп}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ .

### Формирование продольной погрешности детали при круглом шлифовании с продольной подачей

Прямолинейная производящая линия поверхности детали формируется в течение обработки поверхности заготовки за время  $T = \frac{L+H}{V_{S\text{пр}}}$ , с, где  $L$  – длина обрабатываемой поверхности заготовки, мм,  $H$  – ширина шлифовального круга, мм,  $V_{S\text{пр}}$  – скорость продольной подачи, мм/с.

При соотношении периода относительных колебаний шлифовального круга и заготовки и времени формирования прямолинейной производящей линии  $\frac{T}{\tau} \geq 4$  вдоль длины обрабатываемой поверхности за время  $\tau$  проходит не более четверти волны колебаний, что приводит к формированию конусообразности при  $\frac{2\pi}{\omega} \geq 4\tau$ , т.е. при значении отношения скоростей:

$$q < \frac{\pi V}{2\omega(L+H)}.$$

Наложение синусоидальной волны колебаний на продольный профиль заготовки приводит к образованию синусоидальной же погрешности, которая находится из условий:

$$\begin{aligned} &\text{при } q = 0; \Delta_{\text{пр}} = 0, \\ &\text{при } q = \frac{\pi V}{2\omega(L+H)}; \Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{max}} = 2A, \text{ мкм}, \\ &\text{откуда } \Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{\omega(L+H)}{V} q. \end{aligned}$$

Относительные колебания, при которых вдоль длины заготовки укладывается от четверти до половины волны, приводят к образованию седлообразности или бочкообразности. Это происходит при соотношениях скорости главного движения резания и скорости подачи, лежащем в диапазоне:

$$\frac{\pi V}{2\omega} (L+H) \leq q \leq \frac{\pi V}{\omega} (L+H).$$

При  $q \geq \frac{\pi(L+H)}{\omega}$  формируется волнистость продольного профиля.

С дальнейшим увеличением отношения скоростей при  $q \geq \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$  явление самоперерезания волн приводит к уменьшению величины волнистости.

На основании полученных результатов строится характеристика образования продольной погрешности для данного вида шлифования.

1. При  $0 < q < \frac{\pi V}{2\omega(L+H)}$  появляется конусообразность, и значение продольной погрешности выражается зависимостью  $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{\pi(L+H)}{V}$ .

2. В диапазоне  $\frac{\pi V}{2\omega(L+H)} < q < \frac{\pi V}{\omega(L+H)}$  появляется бочкообразность или седлообразность с величиной погрешности  $\Delta_{\text{пр}} = 2A$ .

3. При  $\frac{\pi V}{\omega(L+H)} < q < \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$  образуется волнистость с размахом волны  $2A$ .

4. При  $\frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} < q < \infty$  самоперерезание волн приводит к уменьшению погрешности  $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ .

### Формирование продольной погрешности при врезном шлифовании

Если колебания шлифовального круга относительно заготовки позволяют вдоль длины обрабатываемой поверхности уложиться не более четверти волны, то, как уже было сказано, формируется конусообразность. При круглом врезном шлифовании это явление может наблюдаться, если частота колебаний не будет превышать четверти частоты вращения заготовки  $\omega < \frac{\pi n}{2}$ , т.е. при  $q < \frac{V}{4\omega r}$ .

При этом зависимость величины погрешности определяется из следующих условий:

при  $q = 0$ ;  $\Delta_{\text{пр}} = 0$ ,

при  $q = \frac{V}{4\omega r}$ ;  $\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{max}} = 2A$ , мкм,

и выражается зависимостью  $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{2\pi\omega r}{V} q$ .

При колебаниях с меньшими длинами волн, когда вдоль длины заготовки укладывается от четверти до половины волны, на поверхности детали будут появляться отклонения формы типа бочкообразности. Это явление наблюдается при  $\frac{V}{4\omega r} \leq q < \frac{V}{2\omega r}$ .

При  $q > \frac{V}{2\omega r}$ , вследствие невозможности образования волнистости продольного профиля при врезном шлифовании, наблюдаются отклонения формы, называемые двусторонней конусообразностью, когда знаки наклона соседних фрагментов обрабатываемой поверхности различны. Характеристика процесса образования продольной погрешности для данного вида шлифования описывается на основании проведенных исследований.

1. При  $0 < q < \frac{V}{4\omega r}$  наблюдается конусообразность с величиной погрешности  $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin \frac{2\pi\omega r}{V} q$ .

2. При  $\frac{V}{4\omega r} < q < \frac{V}{2\omega r}$  конусообразность переходит в бочкообразность с погрешностью  $\Delta_{\text{пр}} = 2A$ .

3. В диапазоне  $\frac{V}{2\omega r} < q < \frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$  возникает двусторонняя конусообразность с величиной погрешности  $\Delta_{\text{пр}} = 2A$ .

4. При  $\frac{V}{\omega} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} < q < \infty$  двусторонняя конусообразность с самоперерезанием волн приводит к уменьшению погрешности:  $\Delta_{\text{пр}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}}$ .

Проведённые исследования объясняют изменение погрешности формы детали с изменением отношения скорости резания и скорости подачи при круглом шлифовании.

В качестве примера рассмотрим шлифование цилиндрической детали радиуса  $r = 10$  мм и длины  $L = 1250$  мм шлифовальным кругом, имеющим радиус  $R = 200$  мм и ширину  $H = 80$  мм. Скорость резания  $V = 73$  м/с. Предположим, что неустранимый дисбаланс шлифовального круга вызывает колебания с амплитудой  $A = 1$  мкм. Характеристика шлифования для данного примера сведена в табл. 1.

Таблица 1

Динамическая характеристика образования погрешностей цилиндрической детали

Table 1

*Dynamic characteristics of the formation of errors of a cylindrical part*

Геометрия	Отношение скорости главного движения резания к скорости подачи $q$		Погрешность	
Отношение скоростей $q$	Начало диапазона	Конец диапазона	Вид погрешности	Значение погрешности $\Delta_{\text{пр}}$
Продольная	0	0,24	Конусообразность	$2 \sin 6,65q$
	0,24	0,48	Бочкообразность, седлообразность	$2A$
	0,48	2050	Волнистость	$2A$
	2050	$\infty$	Волнистость с самоперерезанием волн	$2 \sin^2 (3220/q)$
Поперечная	0	20	Погрешность отсутствует, может формироваться эксцентрикитет	0
	20	40	Овальность	$2 \sin(0,08q-1,57)$
	40	300	Огранка	$2A$
	300	2050	Волнистость	$2A$
	2050	$\infty$	Волнистость с самоперерезанием волн	$2 \sin^2 (3220/q)$

При обычной скорости продольной подачи  $V_{\text{спр}} = 40$  м/мин получаем  $q = 109$  и из табл. 1 находим, что продольный профиль имеет волнистость  $\Delta_{\text{пр}} = 2$  мкм, а поперечный профиль – огранку  $\Delta_{\text{поп}} = 2$  мкм. Уменьшением скорости продольной подачи можно добиться перемещения работы в область самоперерезания волн, и тогда, например, при  $V_{\text{спр}} = 1200$  мм/мин получим  $q = 3650$ , а волнистость как в продольном, так и в поперечном сечении уменьшится до величины:

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{поп}} = 2A \sin^2 \frac{\pi V}{2\omega q} \sqrt{\frac{R+r}{A R r}} = 1,2 \text{ мкм.}$$

Приведённый пример показывает, что выбор наилучшего сочетания скоростей резания и подачи может быть сделан лишь на основе решения оптимизационной задачи, рассматривающей изменение точности шлифования как функцию параметров режима резания и динамических факторов, действующих на процесс обработки заготовки.

## Заключение

Все возмущения, действующие на процесс круглого шлифования, в конечном итоге сводятся к незапланированным в технологическом процессе смещениям шлифовального круга относительно заготовки. Эти смещения имеют вибрационные составляющие, каждая из которых определяет погрешности формы и размера обработанной детали. Данное исследование показало, что образующиеся на поверхности детали погрешности не копируют относительные колебания инструмента и заготовки, а являются следствием искажения формообразующих линий, вызванных этими колебаниями. Такое представление формообразования позволило установить связь параметров точности и параметров вибросмещений инструмента относительно заготовки, что, в свою очередь, дает возможность назначать оптимальные режимы резания, способствующие уменьшению погрешности и повышению точности.

### **Список источников:**

1. Каширская Е.Н. Повышение производительности и точности круглого шлифования на основе диагностики процесса: Дисс. ... к.т.н. по спец. 05.02.08. М.: МГУПИ, 1987. – 224 с.
2. Каширская Е.Н. Повышение точности круглого шлифования на основе моделирования процесса формообразования // Науч. Труды ОрелГПИ. – Орел. – 1996. – Т. 8.
3. Ломова О.С., Сорокина И.А. Исследование точности процесса круглого шлифования имитационным моделированием. // Омский научный вестник. – 2013.
4. Ломова О.С., Ломов С.М., Моргунов А.П. Точность обработки деталей на круглошлифовальных станках: монография. – 2011.
5. Кохликян С.А., Баласанян Б.С. О некоторых особенностях колебаний круглошлифовального станка. – 2008.
6. Евтухов В.Г. и др. Моделирование процесса круглого врезного шлифования // Вестник СумДУ. – 2009.

### **Информация об авторе:**

#### **Каширская Елизавета Натановна**

Кандидат технических наук, доцент РТУ МИРЭА, AuthorID 467287, ORCID ID: 0000-0003-2108-8462

### **References:**

1. Kashirskaya E.N. Increasing the Productivity and Accuracy of Cylindrical Grinding Based on Process Diagnostics. Candidate of Technical Sciences Dissertation. Moscow: Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science; 1987.
2. Kashirskaya EN. Increasing the Accuracy of Cylindrical Grinding Based on Simulating the Shaping Process. In: Proceedings of Orel State Pedagogical University. Orel: 1996; vol. 8.
3. Lomova O.S., Sorokina I.A. The Investigation of Precision Cylindrical Grinding Simulation Modelling. Omsk Scientific Bulletin; 2013.
4. Lomova O.S., Lomov S.M., Morgunov A.P. Precision Machining for Cylindrical Grinding Machines; 2011.
5. Kokhlikyan S.A., Balasanyan B.S. On Some Peculiarities of Vibrations of a Cylindrical Grinding Machine; 2008.
6. Evtukhov VG, et al. Simulating the Process of Cylindrical Plunge Grinding. Bulletin of SumDU. 2009.

### **Information about the author:**

#### **Kashirskaya Elizaveta Natanovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at MIREA – Russian Technological University, AuthorID 467287, ORCID ID: 0000-0003-2108-8462

### **Информация об авторе:**

#### **Каширская Елизавета Натановна**

Кандидат технических наук, доцент РТУ МИРЭА, AuthorID 467287, ORCID ID: 0000-0003-2108-8462

### **Information about author:**

#### **Kashirskaya Elizaveta Natanovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of RTU MIREA, AuthorID 467287, <http://orcid.org/0000-0003-2108-8462>

**Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 19.05.2025.**

**The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 24.04.2025; accepted for publication 19.05.2025.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.01/621.81

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-12-25

## ИНСТРУМЕНТЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Владимир Михайлович Третьяков**

Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров, Россия

tretyakov.kovrov@list.ru

**Аннотация.** Для повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения, уменьшения избыточного разнообразия составных частей изделий и компонентов производства, а также для решения задач, связанных с цифровизацией производства, нужны новые эффективные бизнес-процессы создания продукции. Повышение качества, технологичности, эффективности эксплуатации изделий зависит от совершенства их конструкций. Для решения задач конструирования предлагаются три основных инструмента: узлы сопряжения, матрицы подвижностей и промежутки между составными частями изделия. Применение этих инструментов в рамках метода группового проектирования позволяет разрабатывать кастомизированные изделия с низкими затратами на производство единицы продукции и будет способствовать решению задачи цифровой трансформации бизнес-процессов. Являясь самыми общими понятиями, отражающими то, что присуще любым изделиям, предложенные инструменты позволяют приблизиться к решению задачи формализации процесса «придумывания» конструкции. Применение предложенных инструментов иллюстрируется на примере модернизации конструкции подвижного соединения. В исходном изделии подвижная составная часть должна быть заменена на составную часть другой конструкции. В результате выполнения проектной работы установлено, что для этого необходимо ввести дополнительную составную часть и провести разработку ее конструкции.

**Ключевые слова:** конструирование, узел сопряжения, матрица подвижностей, структурная модель, семейство изделий, цифровое производство

**Для цитирования:** Третьяков В.М. Инструменты разработки конструкций изделий машиностроения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 12-25. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-12-25.

Original article

Open Access Article

## TOOLS FOR DEVELOPING MECHANICAL ENGINEERING PRODUCT DESIGN

**Vladimir M. Tretyakov**

Kovrov State Technological Academy of Degtyarev, Kovrov, Russia

tretyakov.kovrov@list.ru

**Abstract.** To enhance the competitiveness of domestic machinery mechanical engineering, to reduce excessive diversity in component parts and production components, as well as to address challenges related to digital transformation of production processes, new efficient business processes for product creation are required. Improving quality, technological sophistication, and operational efficiency of the parts depends on their design perfection. To solve design tasks, the author proposes three main tools namely coupling nodes, mobility matrices, and gaps between component parts of a product. Using these tools within the framework of group design methodology allows developing customized products with low costs per unit produced and will contribute to solving the task of digitizing business processes. Being the most general concepts that reflect what is inherent in any product, the proposed tools can help formalize the process of “inventing” a construction. The paper illustrates applying the proposed tools by an example of modernizing the design of a movable connection. In the original product, a moving part must be replaced with another type of structure. As a result of the project work, it is established that this requires introducing an additional component and designing its structure.

**Keywords:** design, coupling node, mobility matrix, structural model, family of products, digital production

**For citation:** Tretyakov V.M. Tools for Developing Mechanical Engineering Product Design. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 12-25. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-12-25.

---

## Введение

Отечественное машиностроение характеризуется ростом избыточного разнообразия составных частей (СЧ) выпускаемых изделий, технологических процессов, средств технологического обеспечения [1]. Для уменьшения избыточности широко применяются методы унификации, групповые и типовые технологические процессы. Эффективность этих инструментов не достаточна для решения задачи обеспечения конкурентоспособности отечественного машиностроения [1]. Кроме того, в настоящее время основным трендом совершенствования промышленного производства считается его цифровая трансформация [2]. Россия отстает в сфере важнейших научноемких технологий с постепенной потерей основ конкурентоспособности [3].

В [4 – 6] для уменьшения избыточного разнообразия изделий и компонентов производства, а также для решения задач, связанных с цифровизацией, предлагается представлять изделия структурированным множеством модулей. Конструкция изделия (КИ) представляется в виде системы модулей групп деталей. Для детали используется описание в виде системы модулей поверхностей (МП). Если все детали изделия «... заместить совокупностями МП, то КИ можно представить множеством МП». Для описания модульного строения КИ используется граф иерархической структуры [4]. Данный подход может служить целям уменьшения разнообразия компонентов производства и одним из направлений совершенствования их описания с целью повышения эффективности цифровой модернизации. Модули поверхностей, приведенные в [1], выделены из геометрии СЧ с позиций технологии их изготовления. Они не приспособлены к формированию новой конструкции.

Неуправляемый рост избыточности связан с тем, что управлять ей обычно начинают только после разработки изделий. Об этом говорил профессор Н.Г. Домбровский в работе [7]. В [8] отмечено, что повышение технологичности, ремонтопригодности и уровня унификации машин зависит от совершенства структуры изделия, которая в значительной мере, предопределяется методами конструирования. Таким образом, возможности эффективного управления разнообразием изделий, их СЧ и средств технологического обеспечения закладываются в КИ на этапе разработки. Используемый при этом метод конструирования должен позволять разрабатывать кастомизированные изделия с низкими затратами на производство единицы продукции и соответствовать задачам цифровой трансформации. Целью данной статьи является рассмотрение основных инструментов конструирования, которые позволяют приблизиться к решению «главной задачи конструктора при внутреннем проектировании – придумать конструкцию» [9].

## Материалы и методы

*Метод группового проектирования изделий.* Метод разработки семейств унифицированных изделий появился как средство решения задачи унификации выпускаемой продукции [10 – 14] под названием групповое проектирование изделий [15]. Он используется и под другими наименованиями: метод агрегатирования [7, 14], метод базового изделия [10], модульное конструирование [10 – 13], проектирование семейств изделий (*product family engineering*). Число форм проявления группового проектирования продолжает увеличиваться, например, в лице «платформенно-модульного подхода» к разработке робототехнических комплексов [16]. Распространение группового подхода не только на производство и проектирование, но и остальные этапы жизненного цикла изделий привело к пониманию неизбежности появления групповой технологии создания семейств изделий [17]. Зарубежные коллеги существенно опережают нас в ее применении [18].

Объектом группового проектирования является группа, семейство изделий. В результате проектирования создается унифицированная элементная база (ЭБ) составных частей изделий и методика синтеза на ее основе конечной продукции. Элементная база семейства имеет минимальную номенклатуру СЧ, обеспечивающую требуемое разнообразие конечной продукции. Одним из основных признаков, позволяющих установить является ли группа

однородной продукции семейством, служит сходство их СЧ. В [19] предложено считать, что группа изделий является семейством, если они состоят из унифицированных СЧ.

Приспособленность компонента ЭБ к многократному применению в разных изделиях семейства, в том числе и в соединении с разными СЧ, обусловлена особенностями той части его конструкции, которой он обменивается потоками энергии, вещества и сигналов с присоединенным к нему объектом. Эта часть конструкции компонента в [20] названа элементом сопряжения, а позднее получила название узла сопряжения. Узел сопряжения – базовое конструкторское понятие. Совокупность узлов сопряжения – основа для формирования КИ. Выделение узла сопряжения, как первичного элемента конструкции, позволяет определить основные причины избыточного разнообразия СЧ [19], строить структурные модели, более точно отражающие строение изделий, решать задачи структурного синтеза [21], создавать КИ [19]. Понятие узел сопряжения используется не только при разработке одного или группы изделий, но и при проектировании фрагментов СЧ. В работе [22] показан пример использования узлов сопряжения при конструировании кинематических пар, при этом, кроме понятия узел сопряжения, использовались матрицы подвижностей кинематических пар. Таким образом, при использовании группового проектирования удалось выявить основу любой конструкции в лице узла сопряжения. В дополнении к этому теория механизмов и машин предоставила конструктору еще один инструмент разработки – матрицу подвижностей.

### Основные инструменты конструирования

Первый этап процесса разработки технического устройства заключается в определении его принципа действия, второй – связан с созданием КИ. Для механизмов и машин принцип действия принято оформлять в виде кинематической схемы.

Основные инструменты, которые используются при разработке изделий машиностроения:

1. Матрицы подвижностей, структурные уравнения в матричной и алгебраической форме.

Структурное уравнение в матричной форме, приведенное в [23], имеет вид:

$$WQ_m = W_{m-1} + W_{M(m-1)}^u + H_{\Sigma m} - W_{Mm}^u - W_{Mm} - F, \quad (1)$$

где  $WQ_m$  – матрица структурных свойств (подвижностей и избыточных связей) кинематической цепи, полученной формированием  $m$ -го замкнутого контура, она содержит описание подвижностей всего механизма, полученного замыканием всех контуров начиная с первого, включая контур с номером  $m$ , и избыточных связей, возникших только в контуре под номером  $m$ ;  $W_{m-1}$  – матрица общих подвижностей начального механизма, входящего в замкнутый контур под номером  $m$ , которая содержит подвижности всего начального механизма, полученного замыканием всех контуров начиная с первого, включая и контур с номером  $(m-1)$ ;  $H_{\Sigma m} = \sum_{i=1}^{p^m} H_i$  – суммарная матрица подвижностей в кинематических парах, образованных вновь введенными СЧ при формировании замкнутого контура под номером  $m$ ;

$H_i = \begin{vmatrix} t_x & r_x \\ t_y & r_y \\ t_z & r_z \end{vmatrix}$  – матрица подвижностей  $i$ -ой кинематической пары, где  $t_x, t_y, t_z$  – переменные,

равные 1 при наличии поступательных подвижностей (движений) вдоль осей  $X, Y, Z$  и 0 в противном случае;  $r_x, r_y, r_z$  – переменные, принимающие значение 1 при наличии вращательных подвижностей (движений) вокруг осей  $X, Y, Z$  и значение 0 в противном случае;  $p^m = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5$  – число кинематических пар, образованных вновь введенными СЧ при формировании замкнутого контура под номером  $m$ , где  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  – число кинематических пар разных классов;  $W_{M(m-1)}^u$  – матрица местных подвижностей в составе начального механизма СЧ  $u$ , к которой будут присоединены СЧ, вновь вводимые при

формировании  $m$ -го замкнутого контура механизма;  $W_{Mm}^u$  – матрица местных подвижностей СЧ  $u$ , к которой присоединены СЧ, введенные при формировании  $m$ -го замкнутого контура механизма (при образовании замкнутого контура таких СЧ может быть две);  $W_{Mm} = \sum_{j=1}^{n_m} W_{Mj}$  – суммарная матрица местных подвижностей СЧ, вновь введенных при

формировании  $m$ -го замкнутого контура механизма;  $W_{Mj} = \begin{vmatrix} w_M^{tx} & w_M^{rx} \\ w_M^{ty} & w_M^{ry} \\ w_M^{tz} & w_M^{rz} \end{vmatrix}$  – матрица местных подвижностей  $j$ -ой СЧ, где  $w_M^{tx}, w_M^{ty}, w_M^{tz}$  – переменные, принимающие значение 1 при наличии независимых поступательных движений  $j$ -ой СЧ вдоль осей  $X, Y, Z$  и значение 0 в противном случае;  $w_M^{rx}, w_M^{ry}, w_M^{rz}$  – переменные, принимающие значение 1 при наличии независимых вращательных движений  $j$ -ой СЧ вокруг осей  $X, Y, Z$  и значение 0 в противном случае;  $n_m$  – число подвижных СЧ вновь введенных при формировании  $m$ -го замкнутого

контура механизма;  $F = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$  – единичная матрица свободного замыкания контура (матрица

подвижностей свободного твердого тела);  $k = p - n$  – число независимых замкнутых контуров механизма, как разность общего числа его кинематических пар ( $p$ ) и числа подвижных СЧ ( $n$ ).

2. Узлы сопряжения составной части, и производные от них объекты: узел сопряжения – совокупность фрагментов (точек, линий, поверхностей) СЧ, используемых для обмена материальными потоками с другим объектом при заданном их относительном положении (узлы сопряжения на взаимодействующих СЧ идентичны, рис. 1); геометрический элемент СЧ представляет собой геометрическое место всех положений узла сопряжения на ее поверхности, он формируется на основе узла сопряжения с использованием матрицы подвижностей [22], фрагмент геометрического тела СЧ, получаемый «наращиванием» толщины геометрического элемента достаточной для обеспечения требуемой прочности и жесткости создаваемого соединения; основные параметры геометрии узла сопряжения и геометрического элемента; структурные модели (графические и аналитические, см. рис. 1), учитывающие узлы сопряжения (геометрические элементы).

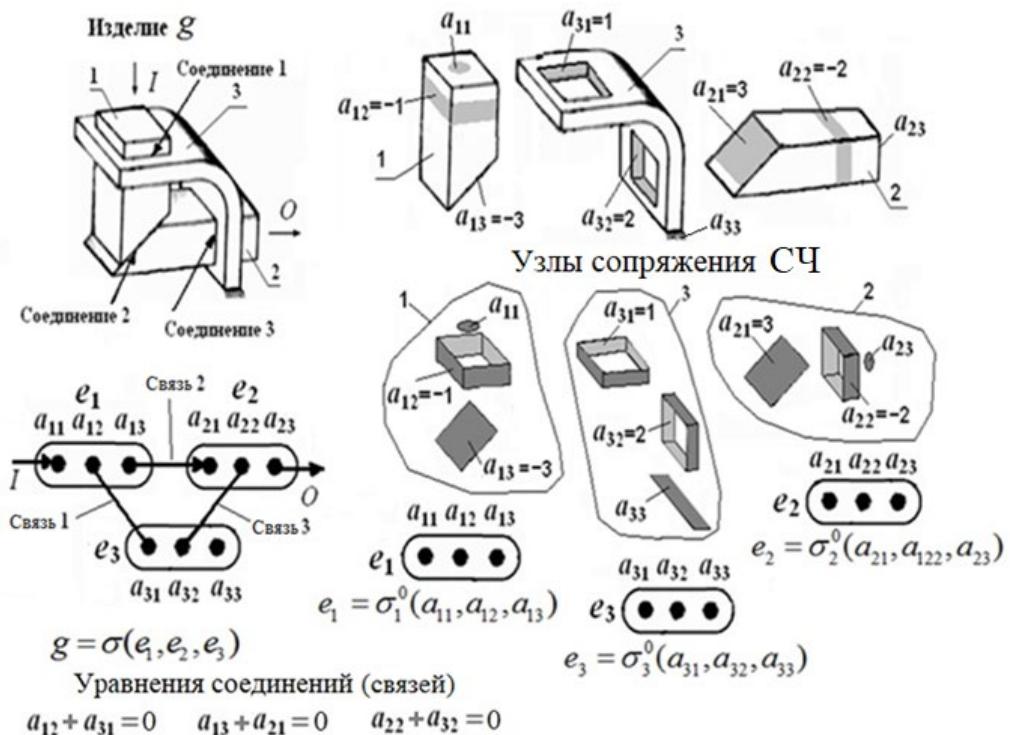


Рис. 1. Изделение  $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$ , его СЧ и модели, учитывающие узлы сопряжения  
Fig. 1. Product  $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$ , its SCH and models taking into account the mating nodes

Состав изделия представляет собой множество входящих в него СЧ: состав  $(g) = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ . Связи изделия – это множество соединений ( $\sigma$ -соединитель), существующих между узлами сопряжения его СЧ: связи  $(g) = \sigma$ . Соединитель представляет собой граф связей вершин, соответствующих узлам сопряжения, и может быть представлен графически (см. рис. 1), матрицей смежности вершин графа (табл. 1), матрицей инцидентности вершин и ребер.

Таблица 1

Состав и соединитель изделия  $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$  (рис. 1)

Table 1

Composition and connector of the product  $g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$  (fig. 1)

состав( $g$ ) $= \{e_1, e_2, e_3\}$	СЧ изделия			$e_1$			$e_2$			$e_3$			$= \sigma$
	Узлы сопряжения			$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	
	Исполнения узлов			-1	-3		3	-2		1	2		
$g = \sigma(e_1, e_2, e_3)$	$e_1$	$a_{11}$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	$= \sigma$
		$a_{12}$	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
		$a_{13}$	-3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	$e_2$	$a_{21}$	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
		$a_{22}$	-2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
		$a_{23}$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$e_3$	$a_{31}$	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
		$a_{32}$	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
		$a_{33}$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Изделие может быть представлено алгебраическим выражением вида:  $g = \sigma(e_1, e_2, \dots, e_n)$ . По аналогии с изделием устройство составной части может быть показано, как конструкция, содержащая узлы сопряжения (геометрические элементы):  $e = \sigma^0(a_1, a_2, \dots, a_r)$ , где соединитель  $\sigma^0$  представляет собой пустой граф, не имеющий ребер (рис. 1, табл. 1).

В качестве показателя исполнения узла (геометрического элемента) используется число или буквенный символ  $K$ :  $a_{ij} = K$  (уравнение исполнения узла сопряжения). Знак показателя исполнения определяется охватываемой (обозначается « $-K$ ») или охватывающей (« $+K$ » или « $K$ ») геометрией узла сопряжения или директивно. Узлы, обозначенные разными показателями  $K$ , отличаются геометрией. Для соединяемых узлов сопряжения выполняется уравнение соединения:

$$a_{ij} + a_{kl} = 0, \quad (2)$$

где в обозначении узла  $a_{ij}$  первый индекс, например,  $i$  – показывает номер СЧ, которой принадлежит данный узел, а второй индекс  $j$  – номер узла в составе ее узлов или номер СЧ присоединенной к этому узлу. Возможно только попарное соединение узлов сопряжения. Также используются уравнения унификации узлов:  $a_{ij} - a_{kp} = 0$ .

Единицы в табл. 1 показывают взаимодействующие узлы СЧ, для которых выполняется уравнение соединения (2).

3. Модели промежутков между СЧ изделия. Способ моделирования изделий в компьютерных системах с использованием создания компьютерных моделей требуемых промежутков между СЧ изделия предложен в [24]. Основное назначение промежутков – формирование фрагментов конструкции, которые не могут быть определены узлами сопряжения.

## Результаты

Упоминаемые выше инструменты конструирования использовались автором для решения различных конструкторских задач. Узлы сопряжения и структурные модели применялись для разработки семейств изделий [19] и конструирования отдельных деталей [25]. Матрицы подвижностей – для корректировки кинематических схем механизмов с целью

устранения избыточных связей [23, 26]. В данной работе инструменты используются для модернизации конструкции подвижного соединения (рис. 2) СЧ1, СЧ2 и СЧ3 (ось). Пример максимально упрощенный. В рассматриваемом примере узел сопряжения и полученный на его основе геометрический элемент совпадают, так как совпадает их геометрия. Это касается узлов сопряжения, осуществляющих взаимодействие СЧ друг с другом. На рисунках штриховыми линиями выделены узлы сопряжения (геометрические элементы) СЧ. Для упрощения рисунков в обозначениях СЧ и их узлов сопряжения опущены буквы, а используются, в основном, цифровые индексы. Буквами «П» обозначены модели промежутков. Промежутки разных СЧ могут пересекаться между собой. Узлы сопряжения  $a_{1i}$  и  $a_{2j}$  на рисунках не показаны.

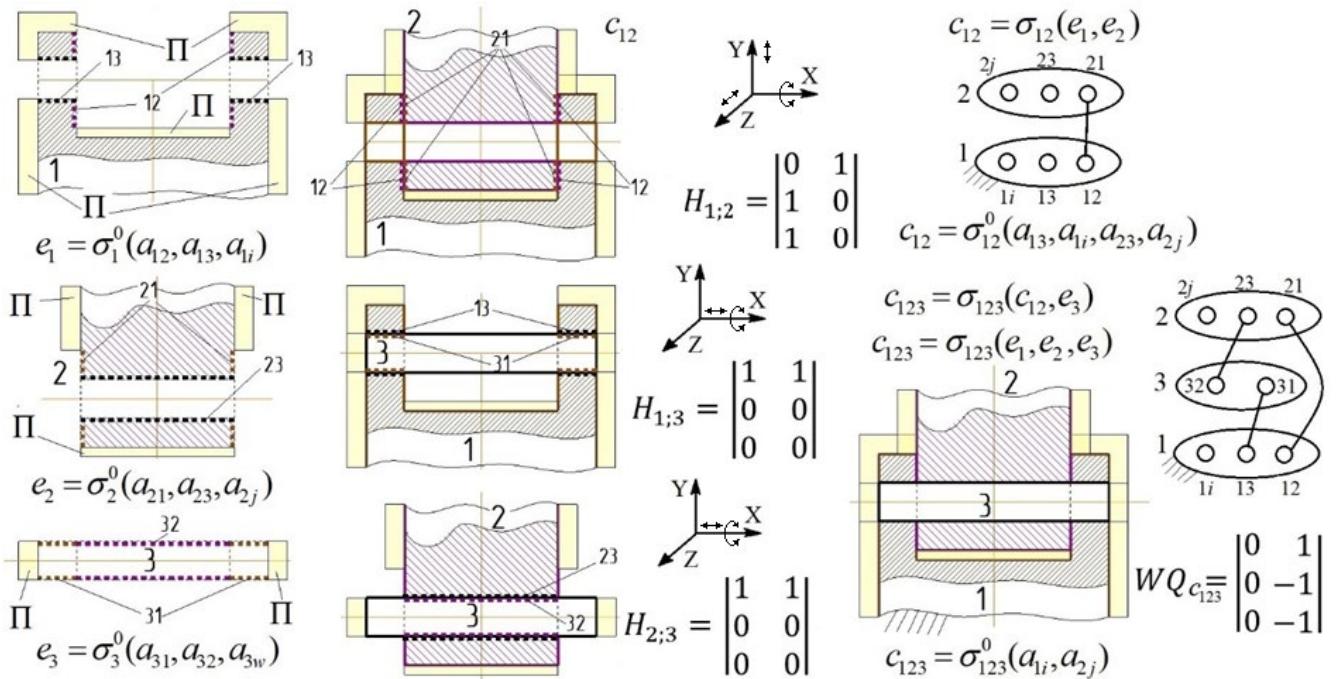


Рис. 2. Подвижное соединение, СЧ, узлы сопряжения, промежутки между СЧ  
Fig. 2. Movable joint, SCH, mating nodes, gaps between SCH

Модели составных частей подвижного соединения, приведенного на рис. 2.

	Состав ( $e_1$ )	$a_{12} = 1$ Плоскости (Пл)	$a_{13} = 2$ Цилиндр (Ц)	$a_{1i} = m$	Узлы (виды узлов)
$e_1 = \sigma_1^0(a_{12}, a_{13}, a_{1i}) =$	$a_{12} = 1$	0	0	0	$= \sigma_1^0$
	$a_{13} = 2$	0	0	0	
	$a_{1i} = m$	0	0	0	
$e_2 = \sigma_2^0(a_{21}, a_{23}, a_{2j}) =$	Состав( $e_2$ )	$a_{21} = -1$ Пл	$a_{23} = 3$ Ц	$a_{2j} = n$	Узлы
	$a_{21} = -1$	0	0	0	$= \sigma_2^0$
	$a_{23} = 3$	0	0	0	
	$a_{2j} = n$	0	0	0	
$e_3 = \sigma_3^0(a_{31}, a_{32}) =$	Состав( $e_3$ )	$a_{31} = -2$ Ц	$a_{32} = -3$ Ц		Узлы
	$a_{31} = -2$	0	0		$= \sigma_3^0$
	$a_{32} = -3$	0	0		

## Определение соединителя и узлов сопряжения сборочных единиц

Соединяя  $e_1$  и  $e_2$  получаем сборочную единицу  $c_{12}$  (см. рис. 2):  $c_{12} = \sigma_{12}(e_1, e_2) = \sigma_{12}(\sigma_1^0(a_{12}, a_{13}, a_{1i}), \sigma_2^0(a_{21}, a_{23}, a_{2j}))$ . Состав  $(c_{12}) =$  Состав  $(e_1) \cup$  Состав  $(e_2)$ . Таблицы соединяемых СЧ объединяются в одну. Полученная расширенная таблица 2 первоначально заполняется нолями. Соединитель сборочной единицы  $c_{12} = \sigma_{12}(e_1, e_2)$  получается путем заполнения единицами ячеек, определяемых узлами сопряжения, образующими соединения. Для этих узлов выполняется уравнение сборки (2). Вид уравнения:  $a_{12} + a_{21} = 0$ . В нашем случае это две ячейки, расположенные симметрично относительно главной диагонали таблицы.

Таблица 2

Состав узлов сопряжения и соединитель сборочной единицы  $c_{12}$

Table 2

*Composition of mating units and connector of assembly unit  $c_{12}$*

Состав $(c_{12})$	$a_{12} = 1$	$a_{13} = 2$	$a_{1i} = m$	$a_{21} = -1$	$a_{23} = 3$	$a_{2j} = n$	Узлы
$a_{12} = 1$	0	0	0	1	0	0	
$a_{13} = 2$	0	0	0	0	0	0	
$a_{1i} = m$	0	0	0	0	0	0	
$a_{21} = -1$	1	0	0	0	0	0	
$a_{23} = 3$	0	0	0	0	0	0	
$a_{2j} = n$	0	0	0	0	0	0	

$= \sigma_{12}$

Узлы сопряжения ( $a_{12}$  и  $a_{21}$ ), которые использованы для соединения СЧ ( $e_1$  и  $e_2$ ), больше не могут применяться для образования соединений. Удаляя из таблицы строки и столбцы, соответствующие ячейкам, в которых расположены единицы, получаем описание  $c_{12} = \sigma_{12}(e_1, e_2)$  как компонента системы верхнего уровня, состоящего из узлов сопряжения  $c_{12} = \sigma_{12}^0(a_{13}, a_{1i}, a_{23}, a_{2j})$  (табл. 3).

Таблица 3

Сборочная единица  $c_{12}$  как черный ящик

Table 3

*Assembly unit  $c_{12}$  as a black box*

Состав $(c_{12})$	$a_{13} = 2$	$a_{1i} = m$	$a_{23} = 3$	$a_{2j} = n$	Узлы
$a_{13} = 2$	0	0	0	0	
$a_{1i} = m$	0	0	0	0	
$a_{23} = 3$	0	0	0	0	
$a_{2j} = n$	0	0	0	0	

$= \sigma_{12}^0$

Соединив  $c_{12}$  и  $e_3$  (СЧ3) получим сборочную единицу  $c_{123} = \sigma_{123}(c_{12}, e_3)$  (см. рис. 2).

Состав узлов сопряжения и соединитель сборочной единицы  $c_{123}$ .

Состав $(c_{123})$	$a_{13} = 2$	$a_{1i} = m$	$a_{23} = 3$	$a_{2j} = n$	$a_{31} = -2$	$a_{32} = -3$	Узлы
$a_{13} = 2$	0	0	0	0	1	0	
$a_{1i} = m$	0	0	0	0	0	0	
$a_{23} = 3$	0	0	0	0	0	1	
$a_{2j} = n$	0	0	0	0	0	0	
$a_{31} = -2$	1	0	0	0	0	0	
$a_{32} = -3$	0	0	1	0	0	0	

$= \sigma_{123}$

Сборочная единица  $c_{123} = \sigma_{123}^0(a_{1i}, a_{2j})$ , как черный ящик.

Состав( $c_{123}$ )	$a_{1i} = m$	$a_{2j} = n$	Узлы
$a_{1i} = m$	0	0	
$a_{2j} = n$	0	0	$= \sigma_{123}^0$

### Корректировка кинематической схемы устройства

Определим структурные свойства сборочной единицы  $c_{123}$ . СЧ1 неподвижна, а СЧ2 – выходное звено. Матрицы подвижностей кинематических пар приведены на рис. 2. Матрица местных подвижностей СЧ3 определяется относительно «остановленных» СЧ1 и СЧ2:

$W_{M3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ . Для оценки структурных свойств рассматриваемой конструкции используем уравнение (1), которое для  $c_{123}$ , показанной на рис. 2, будет иметь вид:

$$WQ_{c123} = H_{1;2} + H_{1;3} + H_{2;3} - W_{M3} - F;$$

$$WQ_{c123} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

В соответствии с данными полученной матрицы  $WQ_{c123}$  СЧ2 вращается вокруг оси  $X$  (верхняя единица второго столбца). При изготовлении необходимо жестко ограничить неперпендикулярность к оси  $X$  плоскостей соприкосновения СЧ1 и СЧ2 (две (-1) избыточные связи – отсутствие вращательных подвижностей вокруг осей  $Y$  и  $Z$ ).

В прототипе  $c_{123}$  заменяем СЧ2 на СЧ2' (рис. 3), где СЧ2'  $e_{2'} = \sigma_{2'}^0(a_{2's} = -5, a_{2'q} = 4, a_{2'j} = n)$ . Оси симметрии СЧ1, СЧ2, СЧ2' располагаются на одной прямой. Подвижность конструкции должна сохраниться. Конструкции СЧ1, СЧ2' и СЧ3 изменять нельзя. Виды исполнений узлов сопряжения СЧ2' приведены на рис. 3. В конструкцию можно вводить только низшие кинематические пары.

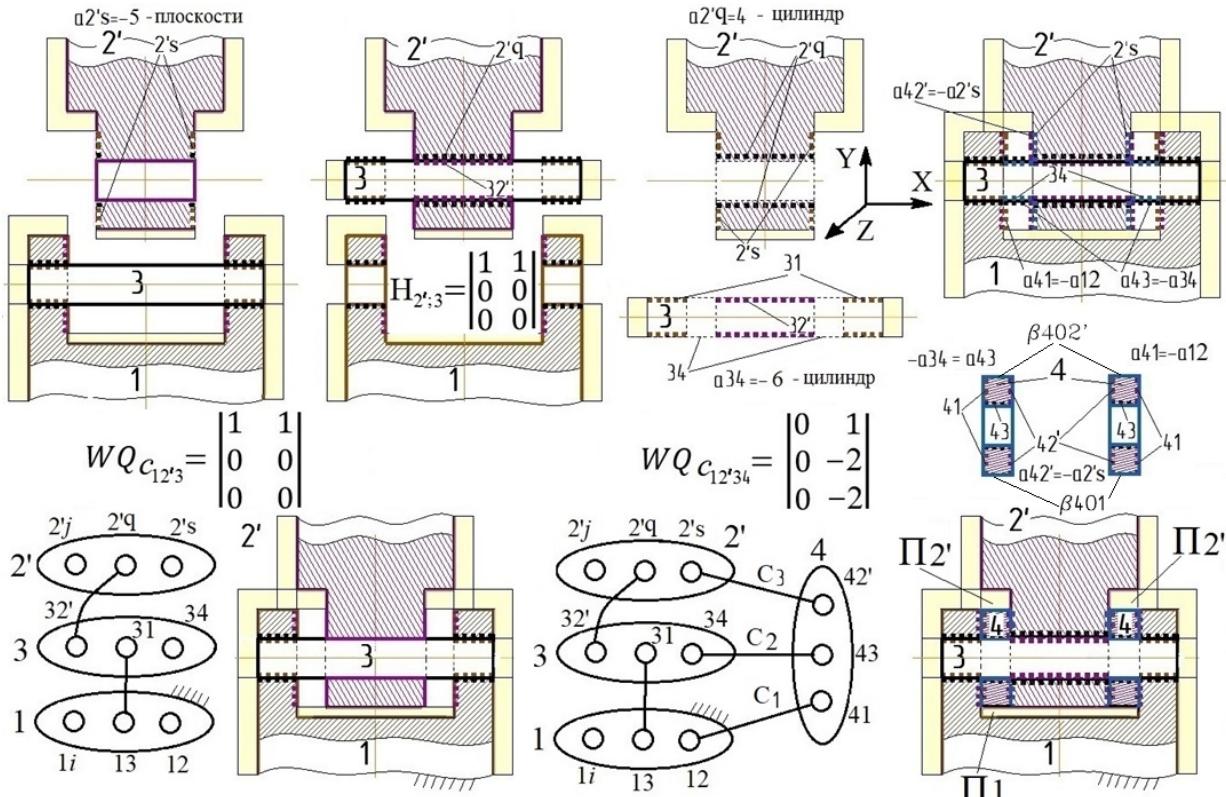


Рис. 3. Новый вариант подвижного соединения и его структурные модели  
Fig. 3. New version of the movable joint and its structural models

Использование соединения  $a_{2'q} + a_{32'} = 0$  определяет исполнение узла СЧ3  $a_{32'} = -a_{2'q} = -4$ . С учетом отсутствия замкнутого контура у  $c_{12'3}$  (левая нижняя часть см. рис. 3) ее структурные свойства определяются из выражения:  $WQ_{c12'3} = H_{1;3} + H_{2';3} - W_{M3}$ .

$$WQ_{c12'3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Полученная сборочная единица  $c_{12'3}$ , кроме вращательной, имеет поступательную подвижность вдоль оси  $X$ . Поскольку изменять эти СЧ нельзя необходимо ввести новую СЧ4, которая должна исключить поступательную подвижность. Предположим, что вновь введенная СЧ4 может иметь местные подвижности и образует соединения  $(c_1, c_2, c_3)$  со всеми имеющимися в конструкции СЧ. Структурная модель такой конструкции показана в нижней части рис. 3. Для нее должно выполняться условие:  $W_{c12'34} = W_{c123}$ .

Узлы сопряжения СЧ3  $c_{123}$  образуют его геометрический элемент  $a_{31} \cup a_{32}$  (см. рис. 2), который используется в новой конструкции для соединения с тремя СЧ (см. рис. 3), поэтому  $a_{31} \cup a_{32} = a_{31} \cup a_{32'} \cup a_{34}$ . Из полученного равенства получаем узел  $a_{34} = a_{32} \setminus a_{32'}$ . Исполнение этого узла обозначим  $a_{34} = -6$  (унаследованный цилиндр с другой длиной образующей).

В конструкции два независимых замкнутых контура. В качестве первого контура рассматриваем СЧ1, СЧ3 и СЧ4. В нем появляются два новых соединения  $c_1, a_{12} + a_{41} = 0$  и  $c_2, a_{34} + a_{43} = 0$ , откуда  $a_{41} = -a_{12} = -1, a_{43} = -a_{34} = 6$ . Полученные данные заносим в табл. 4 и отмечаем единицами три соединения между СЧ сборочной единицы  $c_{134} = \sigma_{134}(e_1, e_3, e_4)$ .

Таблица 4  
Состав и соединитель  $c_{134} = \sigma_{134}(e_1, e_3, e_4)$

Table 4

*Composition and connector  $c_{134} = \sigma_{134}(e_1, e_3, e_4)$*

Состав $(e_1, e_3, e_4)$	$e_1$			$e_3$			$e_4$			СЧ
	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{1i}$	$a_{31}$	$a_{32'}$	$a_{34}$	$a_{41}$	$a_{42'}$	$a_{43}$	
	1	2	$m$	-2		-6	-1		6	Узлы
Пл	Ц	-	Ц		Ц	Пл	Пл		Ц	Исполнения К
$a_{12}=1; \text{Пл}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
$a_{13} = 2; \text{Ц}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
$a_{1i}=m$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{31} = -2; \text{Ц}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{32'} =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{34} = -6; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
$a_{41} = -1; \text{Пл}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{42'} =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{43} = 6; \text{Ц}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	

$=\sigma_{134}$

Структурные свойства  $c_{134}$  определим по формуле:  $WQ_{c134} = H_{1;4} + H_{1;3} + H_{3;4} - W_{M1}^3 - W_{M1}^4 - F$ , где  $W_{M1}^3, W_{M1}^4$  – местные подвижности СЧ3 и СЧ4 в составе первого замкнутого контура. В соответствии с табл. 4 кинематические пары, образованные СЧ3 с СЧ1 и СЧ4 цилиндрические и  $H_{1;3} = H_{3;4} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ , а образованные СЧ1

и СЧ4 плоскостная, поэтому  $H_{1;4} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$ . Виды кинематических пар определяются видами (цилиндр или плоскость) узлов сопряжения.

Определяем в первом замкнутом контуре местные подвижности СЧ3  $W_{M1}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$  и СЧ4  $W_{M1}^4 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ . Для этого останавливаем сопряженные с ними СЧ. Структурные свойства первого замкнутого контура:

$$WQ_{c134} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Присоединив СЧ2' к  $c_{134}$ , получаем второй замкнутый контур и все изделие в целом. Появились еще две связи. Одна из них новая  $c_3: a_{2's} + a_{42'} = 0, a_{42'} = -a_{2's} = 5$ . Вторая уже определена уравнением соединения для  $c_{12'3}: a_{2'q} + a_{32'} = 0, a_{32'} = -a_{2'q} = -4$ . Полученные данные о исполнениях узлов заносим в табл. 5, которая получена из табл. 4 добавлением информации о присоединенной СЧ2'. В соответствии с табл. 5 кинематическая пара, образованная СЧ2' с СЧ3, цилиндрическая  $H_{2';3} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$  (см. рис. 3), а с СЧ4 плоскостная  $H_{2';4} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$ . Для конструкции  $c_{12'34}$  уравнение (1) будет иметь вид:

$$WQ_{c12'34} = WQ_{c134} + H_{2';3} + H_{2';4} + W_{M1}^3 + W_{M1}^4 - W_{M2}^3 - W_{M2}^4 - F.$$

С появлением второго замкнутого контура местные подвижности СЧ3 и СЧ4 не изменились:

$$W_{M3} = W_{M2}^3 = W_{M1}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, W_{M4} = W_{M2}^4 = W_{M1}^4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) получим:

$$WQ_{c12'34} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} + W_{M3} + W_{M4} - W_{M3} - W_{M4} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2 \\ 0 & -2 \end{vmatrix}.$$

Полный состав и соединитель  $c_{12'34}$  приведены в табл. 5. Цветом выделена вновь добавленная СЧ4. Подвижность полученной конструкции равна подвижности прототипа (см. (3)). Число избыточных связей удвоилось, так как удвоилось число замкнутых контуров.

Остался не определенным геометрический элемент СЧ4, который «взаимодействует» с промежутками П1 и П2'. Определение узлов сопряжения СЧ4 и узлов взаимодействующих с ней промежутков П1 и П2' (рис. 4), осуществляется по вращательному движению СЧ2' вокруг оси  $X$  и ее геометрическому элементу (плоскости) подобно тому, как показано в [22]. Эти узлы  $\beta_{014}, \beta_{401}, \beta_{02'4}, \beta_{402'}$  представляют собой отрезки прямой параллельные оси  $X$ . Геометрический элемент СЧ4, «взаимодействующий» с промежутками, представляет собой цилиндр, полученный в результате вращения  $\beta_{02'4}$  или  $\beta_{014}$  вместе с СЧ2'. Выбирается тот из них, радиус вращения которого меньше. Конструкции СЧ4 и  $c_{12'34}$  показаны на рис. 3.

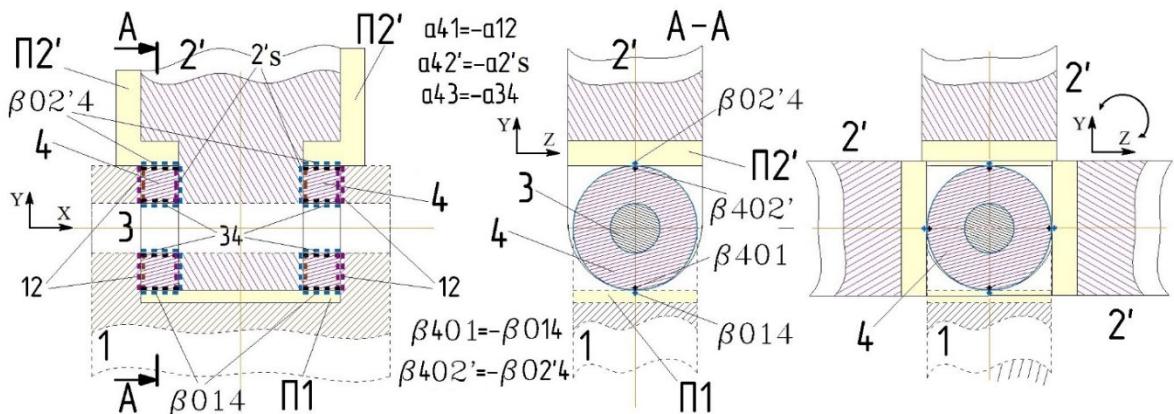
**Полный состав и соединитель**  $c_{12'34} = \sigma_{12'34}(e_1, e_2', e_3, e_4)$

**Full composition and connector**  $c_{12'34} = \sigma_{12'34}(e_1, e_2', e_3, e_4)$

Таблица 5

Table 5

Состав( $e_1, e_2', e_3, e_4$ )	$e_1$			$e_2'$			$e_3$			$e_4$			СЧ Узлы $K$ Виды узлов
	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{1i}$	$a_{2's}$	$a_{2'q}$	$a_{2'j}$	$a_{31}$	$a_{32'}$	$a_{341}$	$a_{41}$	$a_{42'}$	$a_{43}$	
	1	2	$m$	-5	4	$n$	-2	-4	-6	-1	5	6	
	Пл	Ц	-	Пл	Ц	-	Ц	Ц	Ц	Пл	Пл	Ц	
$a_{12}=1$ ; Пл	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
$a_{13} = 2$ ; Ц	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
$a_{1i}=m$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{2's} = -5$ ; Пл	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
$a_{2'q} = 4$ ; Ц	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
$a_{2'j} = n$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{31} = -2$ ; Ц	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{32'} = -4$ ; Ц	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{34} = -6$ ; Ц	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
$a_{41} = -1$ ; Пл	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{42'} = 5$ ; Пл	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
$a_{43} = 6$ ; Ц	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	



**Рис. 4. Образование геометрического элемента СЧ4, «взаимодействующего» с П1 и П2' Fig. 4. Formation of the geometric element SCH4, «interacting» with P1 and P2'**

## Обсуждение

Для идентификации положения узлов на составной части  $e_i$  в [27] введено понятие координат узла сопряжения. Координаты узла  $a_{ip}$  задаются в виде пары  $(M_{ip}, \vec{r}_{ip})$ , определяющей положение привязочной системы координат узла (в ней определена его геометрия) относительно принятой базовой системы координат, которая связана с самой СЧ. Здесь  $M_{ip}$  – матрица косинусов углов между осями привязочной и базовой систем координат составной части  $e_i$ ;  $\vec{r}_{ip}$  – радиус-вектор, определяющий положение привязочной точки привязочной системы координат в базовой системе. Координаты узлов сопряжения позволяют определить положения узлов на СЧ и сборочных единицах [27, 28]. По известным координатам узлов сопряжения и значениям сил рассчитываются силовые факторы, действующие на узлы сопряжения.

Решив задачу конструирования изделия, мы получаем модель, описывающую его геометрическую форму и размеры. Распространив понятие узел сопряжения на сформированную КИ, можно построить ее структурную модель считая компонентами отдельные поверхности (см. рис. 2 в [25]). Узлами сопряжения таких компонентов являются чисто геометрические объекты: линии, по которым пересекаются поверхности КИ.

Структурные модели данного типа являются моделями второго уровня по сравнению с моделями первого уровня, в которых узлы сопряжения являются не только геометрическими, но и физическими объектами, передающими потоки энергии, вещества и сигналов. Имея модели второго уровня можно перейти к моделям первого уровня, в которых узлы сопряжения определяются не с точки зрения решения конструкторских задач, а для других целей, например, технологических.

Применяя понятие узел сопряжения в процессе конструирования необходимо создавать банки исполнений узлов сопряжения и геометрических элементов с целью их унификации для семейств и групп однородной продукции. Избыточное разнообразие исполнений узлов сопряжения одна из основных причин избыточного разнообразия СЧ и компонентов производства.

## Выводы

1. Узел сопряжения – базовое конструкторское понятие. Узлы сопряжения могут быть учтены в структурных моделях на любом уровне разукрупнения проектируемого, изготавливаемого, находящегося в эксплуатации или изучаемого объекта: от системы, рассматриваемой как черный ящик, до наличия полной геометрии всех его СЧ.

2. Структурные модели, учитывающие узлы сопряжения, легко трансформируются в более простые путем слияния вершин, соответствующих узлам сопряжения одной СЧ, в одну вершину, представляющую в модели данную СЧ. Это позволяет применять уже освоенные методы, например, при разработке процессов сборки [29].

3. Матрицы подвижностей и структурные уравнения позволяют определить возможные принципы действия механизма и их модификации, а также число СЧ и виды соединений.

4. Совместное применение узлов сопряжения и матриц подвижностей позволяет сформировать геометрические элементы, являющиеся главной составляющей конструкции изделия.

5. Промежутки, как квази-СЧ, «образуют» с реальными СЧ квази-узлы, которые используются для формирования реальных геометрических элементов создаваемой конструкции.

6. Являясь самыми общими понятиями, отражающими то, что присуще любым изделиям, предлагаемые инструменты конструирования позволяют приблизиться к решению задачи формализации процесса «придумывания» конструкции. На рис. 5 приведены два варианта конструкций винтовых механизмов с одинаковыми кинематическими

характеристиками. Верхний выполнен по схеме, приведенной в [30]. Схема изображена на рисунке. Конструкция второго механизма «придумана» с нуля с помощью предложенных инструментов.

7. Перечисленные инструменты конструирования могут применяться как при разработке одного изделия, так и при проектировании семейства изделий. В результате группового проектирования создается унифицированная элементная база составных частей изделий и методика синтеза на ее основе кастомизированных изделий, обеспечивая минимальные затраты на единицу продукции. На основе элементной базы семейства может быть создана платформа многократно используемых компонентов в том числе и их компьютерные двойники для реализации групповой технологии создания и сопровождения изделий семейства в течении их жизненного цикла.

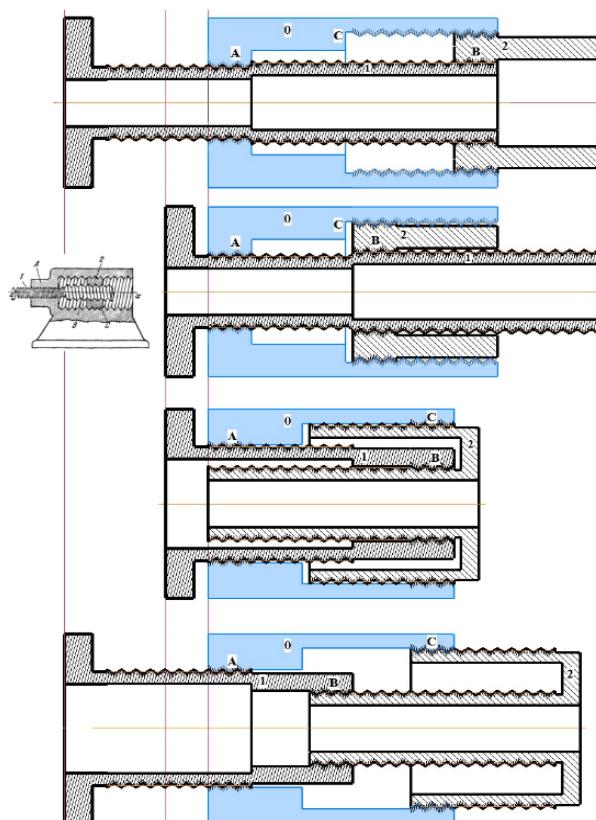


Рис. 5. Винтовые механизмы  
Fig. 5. Screw mechanisms

## Список источников:

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
2. Афанасьев А.А. Цифровая трансформация промышленного производства: теоретические аспекты и политика ее реализации: Научный доклад. – М.: ИЭ РАН, 2024. – 76 с.
3. Белоусов А.Р. Противоречия и перспективы развития системы воспроизведения российской экономики. Автореф. Дис. ... докт. экономических наук. Москва: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2006 г.
4. Базров Б.М., Хейфец М.Л. Описание изделия структурированным множеством модулей // Инновации в машиностроении: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 35-40.
5. Научно-методические основы актуализации теории базирования на основании анализа степеней свободы предмета базирования / Б. М. Базров, Н.А. Родионова, Ю. В. Будкин [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 2(59). – С. 77-87.
6. Базров Б.М. Структура машиностроительного изделия // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 7. – С. 43-48.
7. Межотраслевая унификация и агрегатирование самоходных машин-орудий и автотранспорта / Под ред. В.В. Бойцова. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 448 с.
8. Лось Л.В. Теория структуры конструкций технологических машин и приборов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Харьков, 1992.
9. Бобков Н.М. О конструкторской терминологии национальных стандартов // Стандарты и качество. – 2012. – № 9. – С. 48-52.
10. Р50-54-103-88 «Рекомендации. Модульные и базовые конструкции изделий. Основные положения.». – М.: ВНИИМаш, 1989. – 29 с.
11. Васильев А.Л. Модульный принцип в судостроении // Стандарты и качество. – 1983. – № 1. – С. 8-14.
12. Корытко О.Б. Опыт ускоренного создания исполнительных устройств роботов модульных конструкций // Стандарты и качество. – 1987. – № 4. – С. 26-30.
13. Крейтер С.В. О создании научных принципов модульной разработки и производства изделий // Стандарты и качество. – 1983. – № 1. – С. 6-8.
14. Шебанов В.И. Теоретические предпосылки метода агрегатирования и модульного проектирования // Стандарты и качество. – 1983. – № 2. – С. 8-10.
15. Третьяков В.М. Групповое проектирование унифицированных редукторов для приборов следящего привода: дис. канд. техн. наук: 05.02.02: защищена 03.03.1988: утв. 15.08.1988 / Третьяков Владимир Михайлович. – Владимир, 1987г. – 242 с.
16. Граськин С.С., Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – № 24(12). – С. 619-626.
17. Третьяков В.М. Групповая технология создания семейства изделий // Вестник машиностроения. – 2000. – № 4. – С. 45-48.
18. Berschik M.C., Zuefle M., Laukotka F.N., Krause D. Product family engineering along the life cycle – research aspects to cope with variability in advanced systems; The Author(s), 2024. Published by Cambridge University Press.

## References:

1. Bazrov B.M. Modular Technology in Mechanical Engineering. Moscow: Mashinostroenie; 2001.
2. Afanasyev A.A. Digital Transformation of Industrial Production: Theoretical Aspects and Policy of Its Implementation. Scientific Report. Moscow: Institute of Economics RAS; 2024.
3. Belousov A.R. Contradictions and Evolution of the Reproduction System of the Russian Economy. Doctor of Economic Sciences Dissertation Abstract. Moscow: Institute of Economic Forecasting RAS; 2006.
4. Bazrov BM, Heyfets ML. Description of the Product by Structured Multiple Modules. In: Blumenshteyn VYu, editor. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference on Innovation in Mechanical Engineering; 2019 Nov 26-29; Kemerovo. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2019. p. 35-40.
5. Bazrov BM, Rodionova NA, Budkin YV, et al. Scientific and Methodological Foundations of the Locating Theory Actualization Based on the Degrees of Freedom Analysis of the Locating Object. Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. 2022;(2):77-87.
6. Bazrov B.M. Mechanical Product Structure. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2024;(7):43-48.
7. Boytsov VV, editor. Intersectoral Unification and Aggregation of Self-Propelled Machines and Automobile Transport. Moscow: Standards Publishing House; 1975.
8. Los L.V. The Structure Theory of Design of Technological Machines and Devices. Doctor of Technical Sciences Dissertation Abstract. Kharkov; 1992.
9. Bobkov N.M. On Design Terminology of National Standards. Standards and Quality. 2012;(9):48-52.
10. Р50-54-103-88 Recommendations. Modular and Basic Constructions of Products. Main Provisions. Moscow: VNIIINMASH; 1989.
11. Vasilyev A.L. Modular Principle in Shipbuilding. Standards and Quality. 1983;(1):8-14.
12. Korytko O.B. Experience of Accelerated Creation of Executive Devices of Modular Robots. Standards and Quality. 1987;(4):26-30.
13. Kreiter S.V. Establishing Scientific Principles for Modular Development and Manufacturing of Products. Standards and Quality. 1983;(1):6-8.
14. Shebanov V.I. Theoretical Assumptions of Aggregation Method and Modular Design. Standards and Quality. 1983;(2):8-10.
15. Tretyakov V.M. Group Design of Unified Gearboxes for Tracking Drive Instrumentation. Candidate of Technical Sciences Dissertation Abstract. Vladimir; 1987.
16. Graskin S.S, Ermolov I.L., Khrupunov S.P. Conceptual Propositions for Creation of Perspective Robotic Systems Based on Platform-Modular Approach. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2023;(24):619-626.
17. Tretyakov V.M. Group Technology for Creating Families of Products. Russian Engineering Research. 2000;(4):45-48.
18. Berschik MC, Zuefle M, Laukotka FN, et al. Product Family Engineering Along the Life Cycle – Research Aspects to Cope with Variability in Advanced Systems. Cambridge: Cambridge University Press; 2024.

19. Третьяков В.М. Конструирование семейств изделий машиностроения. Монография: [в 2 ч.]. / В.М. Третьяков; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования «Ковровская гос. Технологическая акад. им. В.А. Дегтярева». Ковров, 2009.

20. Третьяков В.М. Групповое проектирование технических устройств. Разработка элементной базы // Автоматизация и современные технологии. – 1997. – № 9. – С. 10-21.

21. Третьяков В.М. Математические модели для определения номенклатуры компонентов элементной базы семейства машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 2. – С. 8-13.

22. Третьяков В.М. Формирование простых кинематических пар на основе узла сопряжения «точка» // Теория механизмов и машин. – 2015. – № 2. – Т. 13. – С. 46-61.

23. Третьяков В.М. Построение рациональных планетарных механизмов на основе матричного метода структурного анализа // Транспортное машиностроение. – 2022. – №4(4). – С. 4-16.

24. Третьяков В.М. Способ моделирования многокомпонентных изделий в компьютерных системах двух- и трехмерного проектирования. Патент на изобретение №2622211 заявитель и патентообладатель АО «ВНИИ «Сигнал» – №2014125774; заявл. 25.06.2014; опубл. 13.06.2017, Бюл. №17.

25. Третьяков В.М. Использование понятия «узел сопряжения» при конструировании изделий машиностроения // Вестник в машиностроения. – 2010. – № 12. – С. 24-30.

26. Третьяков В.М. Матричный метод структурного анализа и синтеза механизмов // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2022. – № 11. – С. 137-150.

27. Третьяков В.М. Конструирование изделий машиностроения. Определение координат узлов сопряжения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 10. – С. 11-21.

28. Третьяков В. М. Применение узлов сопряжения при проектировании изделий // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2014. – № 4. – С. 443-453.

29. Божко А.Н., Ливанцов В.Э. Оптимизация стратегии геометрического анализа в автоматизированных системах проектирования // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 825-840.

30. Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике: Справочное пособие. В 7 томах. Т.III. Рычажно-кулачковые, ... – 2-е изд., переработанное. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 416 с

19. Tretyakov V.M. Design of Family of Mechanical Engineering Products. Kovrov: Kovrov State Technological Academy of Degtyarev; 2009. 2 vols.

20. Tretyakov V.M. Group Design of Technical Equipment. Element Base Development. Automation. Modern Technologies. 1997;(9):10-21.

21. Tretyakov V.M. Mathematical Models for Determining Component List of Element Base for Family of Machines. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 1999;(2):8-13.

22. Tretyakov V.M. Formation of Simple Kinematic Pairs on the Basis of an Interface Node "Point". Theory of Mechanisms and Machines. 2015;(2)(13):46-61.

23. Tretyakov V.M. Construction of Efficient Planetary Gears Based on the Matrix Method of Structural Analysis. Transport Engineering. 2022;(4)(4):4-16.

24. Tretyakov V.M. Modelling Multicomponent Products in Computer-Based Two-Dimensional and Three-Dimensional Design Systems. Patent RU 2622211C1; Jun 13, 2017.

25. Tretyakov V.M. Use of the Concept Interfacing Node in the Design of Engineering Products. Vestnik Mashinostroyenia. 2010;(12):24-30.

26. Tretyakov V.M. Matrix Method of Structural Analysis and Synthesis of Mechanisms. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2022;(11):137-150.

27. Tretyakov V.M. Mechanical Engineering Product Design. Defining Coordinates of Coupling Nodes. Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making. 2010;(10):11-21.

28. Tretyakov V.M. Application of Coupling Nodes in Product Design. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2014;(4):443-453.

29. Bozhko A.N, Livantsov V.E. Optimization of Geometric Analysis Strategy in CAD-Systems. Computer Research and Modelling. 2024;16(4):825-840.

30. Artobolevskiy I.I. Mechanisms in Modern Engineering Design: Reference Guide. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1979. Volume 3, Gear Mechanisms.

## Информация об авторах:

### Третьяков Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор кафедры «Гидропневмоавтоматики и гидропривода» «Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева»

Статья поступила в редакцию 15.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 15.03.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 19.05.2025.

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

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

## Information about the authors:

### Tretyakov Vladimir Mikhaylovich

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Hydraulic and Pneumatic Automation and Hydrodrive of Kovrov State Technological Academy of Degtyarev

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 681.5:62-5

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-26-34

## МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ ОСЕЙ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ ПОСРЕДСТВОМ МНОГОФАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННОГО СТЕНДА

Илья Александрович Фролов<sup>1</sup>, Денис Витальевич Тарасов<sup>2</sup>,

Андрей Александрович Воротников<sup>3</sup>, Юрий Викторович Подураев<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Российский университет медицины Минздрава России, МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Россия

<sup>1</sup> frol.451@yandex.ru

<sup>2</sup> demchok123@gmail.com

<sup>3</sup> aavorotnikov90@gmail.com

<sup>4</sup> poduraex@mail.ru

**Аннотация.** Целью данной работы является разработка методики многофакторных испытаний осей медицинских роботов с использованием инерционного стенда. Инерционный стенд представляет из себя комбинацию испытываемого мехатронного модуля, соединённой с массой нагрузки, приводимой в движение двигателем через электромагнитную муфту, силомоментного датчика и двух оптических датчиков положения. В ходе проведённых испытаний были определены характеристики номинальных параметров торможения, а также установлены зависимости параметров тормозного процесса от заданной скорости и величины внешнего момента инерции. Данные с датчиков, в ходе тестов, собирались и обрабатывались платой STM32, после чего записывались в файл формата .txt. Основываясь на результатах исследования, возможно дальнейшее изменение конструктивных параметров мехатронного модуля оси медицинского робота с целью изменения вида функциональной зависимости, определяющей качество работы устройства.

**Ключевые слова:** медицинские роботы, мехатронный модуль, методика испытаний, многофакторные испытания, инерционный стенд, роботизированные системы

**Для цитирования:** Фролов И.А. Тарасов Д.В. Воротников А.А. Подураев Ю.В. Методика испытания осей медицинских роботов посредством многофакторных испытаний с использованием инерционного стенда // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 26-34. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-26-34.

Original article

Open Access Article

## METHODOLOGY FOR TESTING MEDICAL ROBOT AXES USING MULTIFACTORIAL TESTS WITH AN INERTIAL TEST BENCH

Илья А. Фролов<sup>1</sup>, Денис В. Тарасов<sup>2</sup>, Андрей А. Воротников<sup>3</sup>, Юрий В. Подураев<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

<sup>1</sup> frol.451@yandex.ru

<sup>2</sup> demchok123@gmail.com

<sup>3</sup> aavorotnikov90@gmail.com

<sup>4</sup> poduraex@mail.ru

**Abstract.** This work aims to develop a methodology for multi-factor testing of medical robot axes using an inertia test bench, which consists of a mechatronic module under test connected to a load mass driven by a motor through an electromagnetic clutch, along with a force-torque sensor and two optical position sensors. During the conducted experiments, the authors determine the characteristics of nominal braking parameters, as well as relationships between brake process parameters and given velocity and magnitude of external moment of inertia; collect data from the sensors and process it by an STM32 board, then record it in a text file format (txt). Based on these findings, further adjustments can be made to the design parameters of the mechatronic axis module of a medical robot to modify its functional dependence and improve device performance.

**Keywords:** medical robots, mechatronic module, testing method, multi-factor tests, inertia test bench, robotic systems

**For citation:** Frolov I.A., Tarasov D.V., Vorotnikov A.A., Poduraev Yu.V. Methodology for Testing Medical Robot Axes Using Multifactorial Tests with an Inertial Test Bench. Automation and modeling in design and management,

---

## Введение

Одной из основных задач мехатроники и робототехники является оптимизация характеристик мехатронных модулей, ключевых компонентов осей роботов. Актуальность данной задачи подчеркивается исследованием [1]. В данном научном труде объектом исследования являлся мехатронный модуль, применяемый для приведения в движение звеньев медицинского робота. Целью исследования выступала разработка и обоснование методологии проведения испытаний мехатронного модуля. Тестирование осуществлялось с использованием автоматизированного экспериментального стенда.

Мехатронные модули используются для реализации заданных законов движения и торможения. Область применения таких модулей достаточно обширна и определяется задачами, стоящими перед роботом [2]. Выбор компоновки и элементов, составляющих конструкцию мехатронного модуля, зависит от поставленных перед ним задач. Ряд общих требований, предъявляемых к мехатронным модулям, включает в себя компактность, энергоэффективность, способность к выполнению заданных законов движения и торможения, высокую скорость работы, высокий КПД, а также надежность и долговечность [3].

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов испытаний мехатронных модулей являются испытания с использованием инерционных систем [4]. Этот метод позволяет проводить многофакторные испытания, направленные на выявление соответствия заданных характеристик (движения, торможения, генерируемого момента и величины люфта) фактическим характеристикам мехатронных модулей.

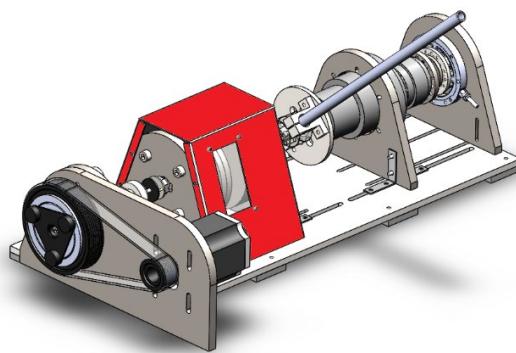
Помимо этого, рассматриваются альтернативные подходы к испытаниям мехатронных модулей, включая использование механического воздействия на мехатронный модуль с помощью конструктивных элементов робота. Описание одного из таких методов представлено в исследовательской работе [5]. Однако данная методика обеспечивает возможность измерения ограниченного числа характеристик и обладает значительной погрешностью, т.к. измерения базируются на системе датчиков, встроенных непосредственно в модуль.

Альтернативным источником возмущающего воздействия может служить нагружочный двигатель, напрямую соединенный с мехатронным модулем [6]. Тем не менее, применение данного подхода плохо поддается унификации из-за необходимости индивидуального подбора нагружочного двигателя в зависимости от параметров конкретного модуля. Это приводит к необходимости кардинально менять конструктивные элементы стенда, что значительно увеличивает время, требуемое для проведения испытаний.

Разработанная в ходе данного исследования методика была направлена на изучение номинальных параметров торможения, а также установления зависимости параметров тормозного процесса от задаваемой скорости выходного фланца и величины внешнего момента инерции. Повышение точности медицинских роботов, при проведении хирургических манипуляций, имеет потенциал к уменьшению длительности операций и снижению травматического воздействия на ткани, расположенные внутри операционного поля. Уменьшение вероятности нежелательных последствий при работе медицинского робота способно положительно сказаться на сроке реабилитации пациентов. Анализ временных характеристик торможения дополнитель но может быть использован для коррекции программного обеспечения системы управления медицинского робота.

## Инерционный стенд и методика проведения испытаний осей медицинских роботов

Стенд испытания характеристик осей медицинских роботов включает набор маховиков с возможностью закрепления на основной вал, врачающийся электродвигателем. Основной вал присоединяется к электродвигателю посредством электромагнитной муфты и ременной передачи, обеспечивающей разъединение вала двигателя и основного вала при достижении требуемой скорости вращения. На выходе основного вала обеспечена возможность установки испытываемой оси медицинского робота. Также обеспечена возможность регистрировать угловое положение вала на входе и на выходе испытываемой оси. Стенд обеспечен защитным кожухом, установленным в плоскости вращения маховиков. Конструкция стенда, с установленной осью медицинского робота, показана на рис. 1.



**Рис. 1. Инерционный стенд для многофакторных испытаний**  
*Fig. 1. Inertial stand for multifactorial tests*

Стенд испытания осей медицинских роботов состоит из трёх подсистем:

1. Подсистема разгона. Подсистема предназначена для разгона основного вала до требуемых, согласно программе испытаний, величин угловой скорости при испытании осей медицинских роботов на воздействие внешних факторов. Встроенная электромагнитная муфта служит для расцепления вала двигателя непосредственно перед проведением испытаний. Это необходимо для исключения влияния вала двигателя на основной вал с закреплёнными маховиками во время проведения измерений. Соединяется с подсистемой маховиков посредством сильфонной муфты для компенсации осевого и радиального биения.

2. Подсистема маховиков. Подсистема предназначена для обеспечения требуемого для испытаний момента инерции основного вала. Возможна установка до пяти маховиков с совокупным моментом инерции до  $0,015 \text{ кг}/\text{м}^2$ . Оснащена защитным кожухом, защищающим оператора от вращающихся элементов подсистемы.

3. Подсистема измерения. Подсистема предназначена для измерения всего перечня исследуемых функциональных характеристик оси медицинского робота. За счёт встроенного датчика момента, а также двух угловых датчиков положения на входе и на выходе, подсистема позволяет регистрировать перемещение, величину момента торможения, а также тормозной путь испытываемой оси медицинского робота. Специальный переходник позволяет мануально создавать момент на входе испытываемой оси без участия подсистемы разгона и подсистемы маховиков. Подсистема измерения имеет несколько конфигураций, предназначенных для испытаний различных исследуемых функциональных характеристик.

Погрешность измерения параметров соответствует погрешности средств измерения, используемых для фиксации значений:

а) максимально допустимая погрешность измерения моментов при использовании однокомпонентного силомоментного датчика:  $\pm 0,1\%$ ;

б) максимально допустимая погрешность измерения температуры поверхности корпуса мехатронного модуля при использовании пирометра:  $\pm 1,5\%$ ;

в) максимально допустима погрешность измерения частоты вращения при использовании абсолютного углового энкодера:  $\pm 30''$

В рамках исследования был выделен перечень ключевых функциональных характеристик, определение значений которых являлось необходимым для комплексной оценки характеристик оси медицинского робота. Обоснование выбора данных характеристик связано с их влиянием на эффективность функционирования системы. Наименование и размерность указанных характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1  
**Исследуемые функциональные характеристики**

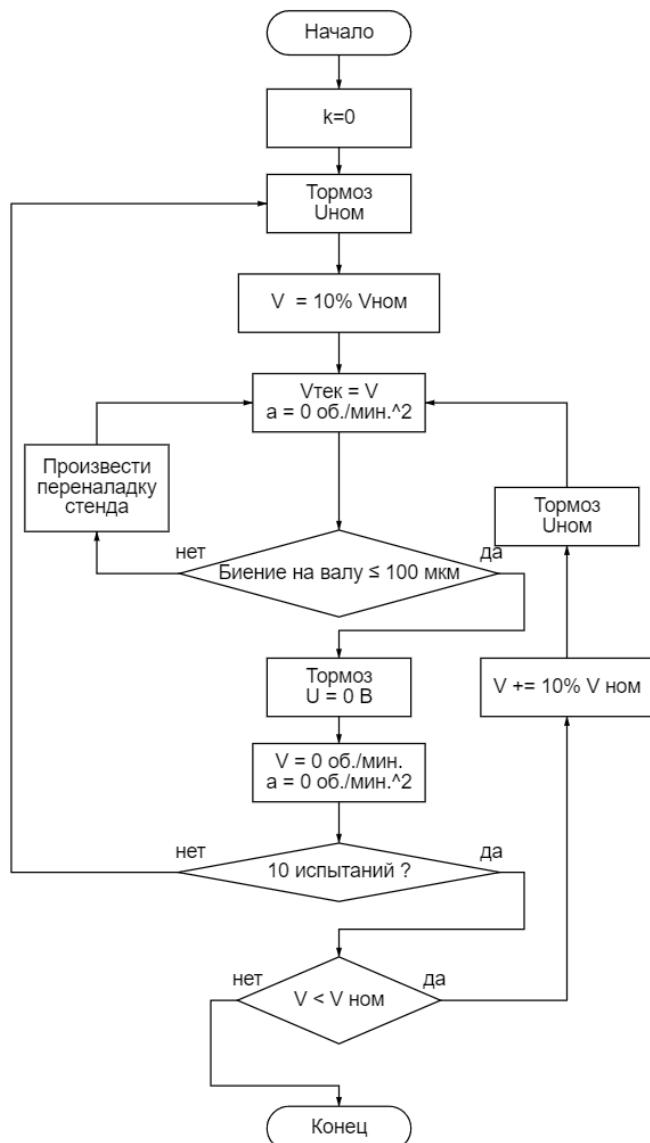
*Table 1*

*Functional characteristics under study*

№	Функциональная характеристика	Тип измерения	Размерность
1	Номинальное время торможения	Прямое	мс
2	Номинальный тормозной путь оси медицинского робота	Прямое	°
3	Тормозной путь в зависимости от величины скорости выходного фланца оси медицинского робота	Прямое	°
4	Тормозной путь в зависимости от воздействия внешнего момента инерции на выходной фланец оси медицинского робота	Прямое	°

Для оценки влияния скорости вращения выходного фланца оси медицинского робота на время торможения и длину тормозного пути в рамках сформированной методики был реализован комплекс функциональных испытаний, основанных на последовательном проведении экспериментов с изменением ключевых параметров движения. На первом этапе на тормозную систему мехатронного модуля подаётся номинальное напряжение, а скорость вращения выходного фланца устанавливается на уровне 10 % от номинальной. Далее выполняется контроль радиального биения вала на всём его диапазоне перемещения с использованием индикатора часового типа. В случае, если величина биения превышает допустимый уровень в 100 мкм, производится переналадка стенда.

После подтверждения стабильности задаваемой скорости с помощью абсолютного углового энкодера фиксировались параметры тормозного процесса, время торможения и тормозной путь. Полученные данные фиксировались и систематизировались в таблице экспериментальных результатов. Температура наружной поверхности корпуса оси медицинского робота измерялась по завершении десяти последовательных испытаний. При условии, что заданная скорость составляет менее номинального значения, эксперимент повторяется с увеличением скорости на 10 %. Блок-схема проведения испытаний представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Блок-схема испытаний, проводимых с целью определения зависимости между временем торможения, тормозным путём и скоростью выходного фланца оси медицинского робота**  
*Fig. 2. Block diagram of tests conducted to determine the relationship between braking time, braking distance and output flange speed of the medical robot axis*

На рис. 2:  $k$  – количество стальных дисков в подсистеме маховиков;  $U$  – напряжение на фрикционном тормозе мехатронного модуля (В);  $V$  – скорость вращения выходного фланца мехатронного модуля (об/мин);  $a$  – ускорение выходного фланца мехатронного модуля (об/мин<sup>2</sup>).

На следующем этапе исследования была проведена оценка влияния внешнего момента инерции на время торможения и тормозной путь. Для этого методика испытаний была дополнена комплексом функциональных испытаний, направленных на анализ динамики тормозного процесса при различных значениях момента инерции.

Испытания проводились при номинальной скорости вращения выходного фланца мехатронного модуля. Систематическое изменение момента инерции осуществлялось путём добавления стальных дисков в подсистему маховиков. Если количество установленных дисков было менее пяти, в подсистему добавлялся ещё один диск, и цикл экспериментов повторялся. Для повышения достоверности результатов на каждом этапе экспериментов фиксировался средний момент торможения на основе десяти последовательных испытаний. Полученные данные фиксировались и систематизировались в таблице экспериментальных результатов. Блок-схема испытаний представлена на рис. 3.

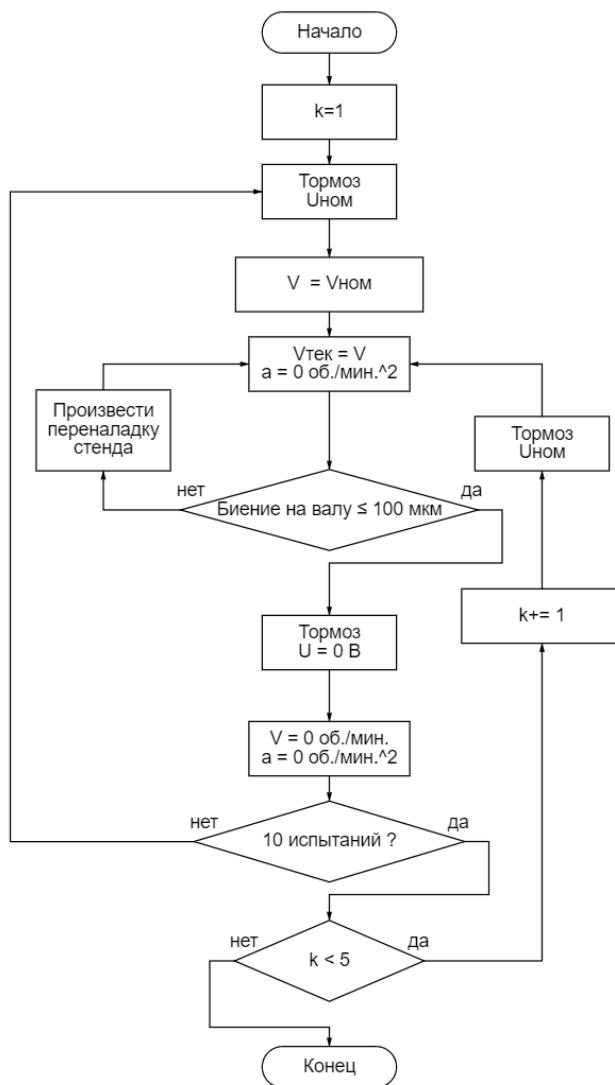


Рис. 3. Блок-схема испытаний, проводимых с целью определения зависимости между временем торможения, тормозным путём и моментом инерции на выходном фланце оси медицинского робота  
Fig. 3. Block diagram of tests conducted to determine the relationship between braking time, braking distance and moment of inertia at the output flange of the axis of a medical robot

На рис. 3:  $k$  – количество стальных дисков в подсистеме маховиков;  $U$  – напряжение на фрикционном тормозе мехатронного модуля (В);  $V$  – скорость вращения выходного фланца мехатронного модуля (об/мин);  $a$  – ускорение выходного фланца мехатронного модуля (об/мин<sup>2</sup>).

## Результаты

В процессе экспериментальных исследований, выполненных в соответствии с разработанной методикой, были изучены зависимости времени торможения и величины тормозного пути от скорости вращения выходного фланца оси медицинского робота. Экспериментальные данные, полученные при номинальной скорости вращения выходного фланца представлены на рис. 4.

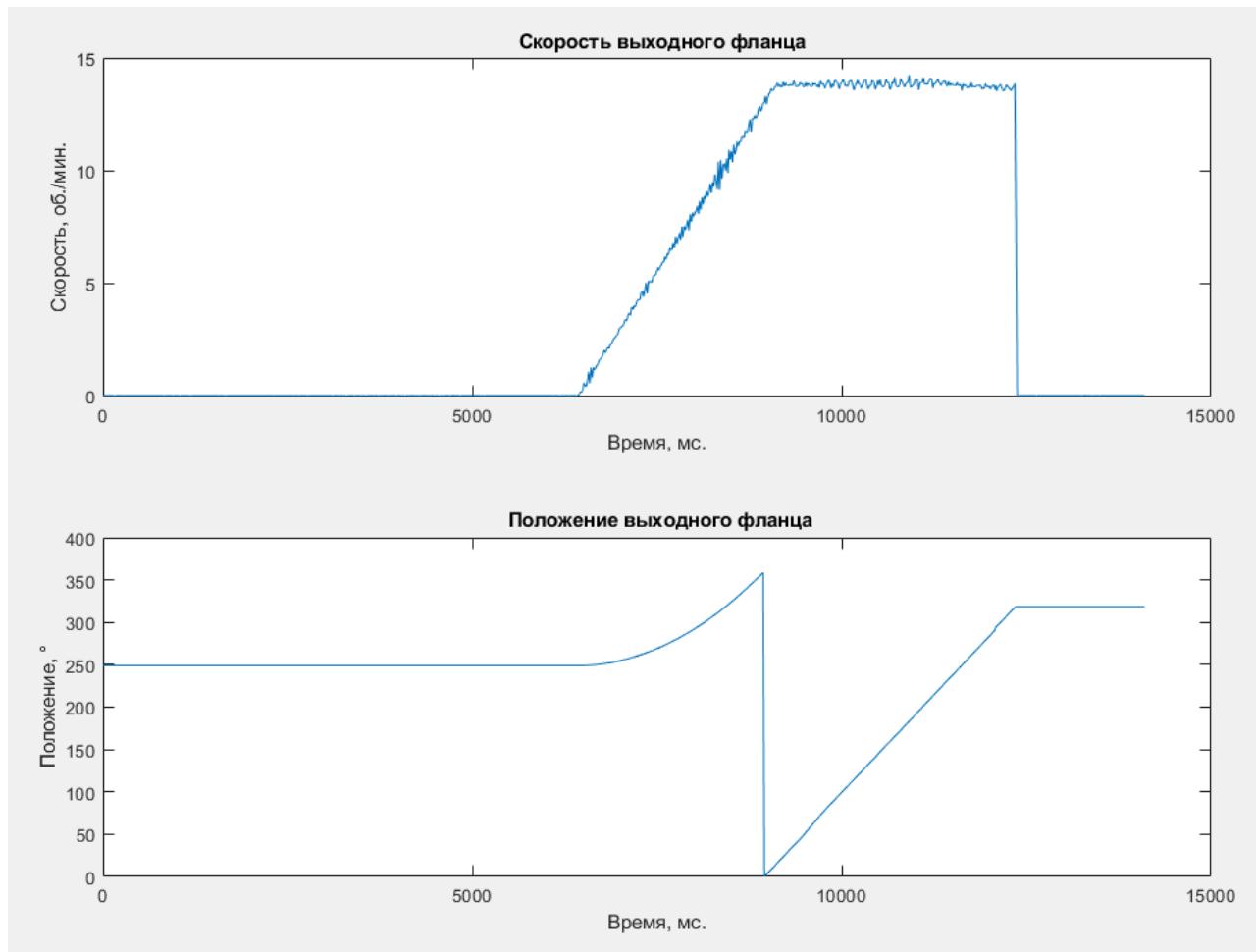


Рис. 4. Графическое представление данных, полученных при проведении испытаний, устанавливающих зависимость между скоростью вращения выходного фланца и его тормозного пути, для скорости вращения выходного фланца – 100 % от номинальной

Fig. 4. Graphical representation of data obtained during tests establishing the relationship between the output flange rotation speed and its braking distance, for an output flange rotation speed of 100% of the nominal

По завершении испытаний, проведённых для всех заданных значений скорости в соответствии с разработанной методикой, была построена зависимость тормозного пути от скорости вращения выходного фланца. Для повышения наглядности результатов экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второй степени. График зависимости представлен на рис. 5.

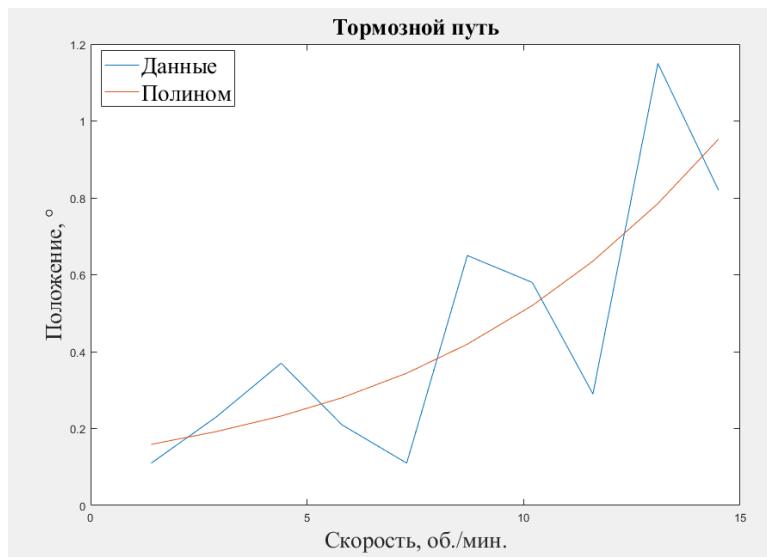


Рис. 5. Зависимость тормозного пути от скорости выходного фланца оси медицинского робота  
 Fig. 5. Dependence of the braking distance on the speed of the output flange of the axis of the medical robot

На рис. 6 представлены результаты испытаний, выполненных в соответствии с методикой, направленной на изучение зависимости тормозного пути от момента инерции, приложенного к выходному фланцу оси медицинского робота. Эксперимент проводился при номинальной скорости вращения выходного фланца и максимальном значении момента инерции, предусмотренном параметрами инерционного стенда.

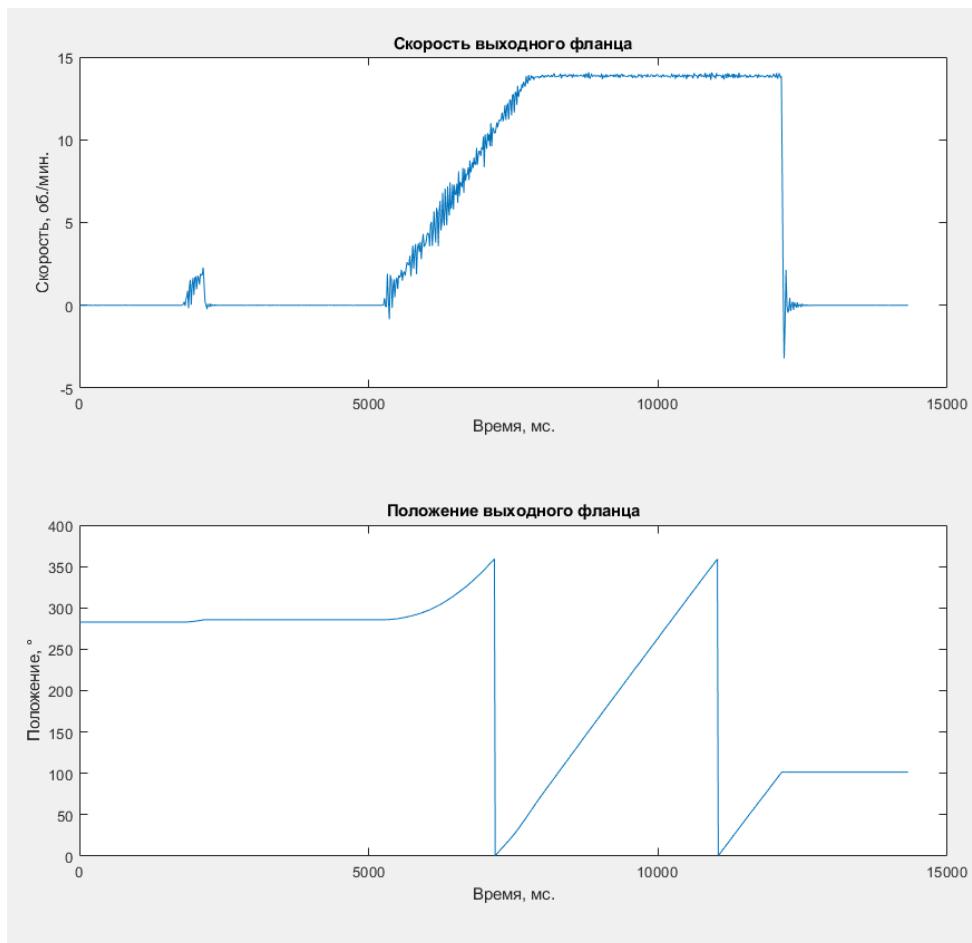
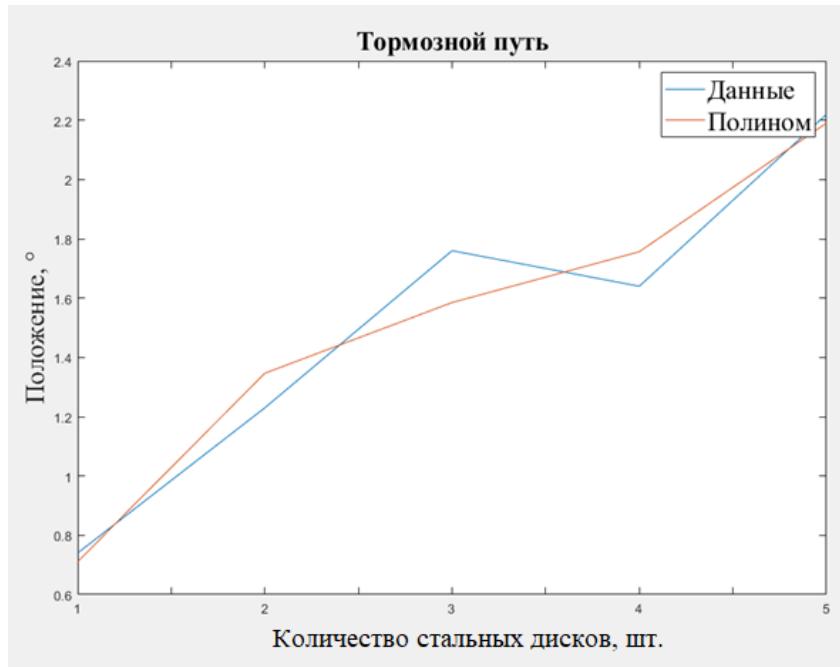


Рис. 6. Графическое представление данных, полученных при проведении испытаний, устанавливающих зависимость между моментом инерции на выходном фланце и его тормозного пути, при наличии 5-ти стальных дисков в подсистеме маховиков

Fig. 6. Graphical representation of data obtained during tests establishing the relationship between the moment of inertia on the output flange and its braking distance, in the presence of 5 steel disks in the flywheel subsystem

По завершении испытаний, проведённых для всех заданных значений моментов инерции в соответствии с разработанной методикой, была построена зависимость тормозного пути от момента инерции на выходном фланце оси медицинского робота. Для повышения наглядности результатов экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второй степени. График зависимости представлен на рис. 7.



**Рис. 7. Зависимость тормозного пути от количества стальных дисков устанавливаемых в подсистеме маховиков испытательного стенда, определяющих момент инерции на выходном фланце оси медицинского робота**

*Fig. 7. Dependence of the braking distance on the number of steel disks installed in the flywheel subsystem of the test bench, determining the moment of inertia on the output flange of the axis of the medical robot*

### Заключение

Анализ экспериментальных данных продемонстрировал, что предложенная методика является эффективным инструментом для оценки динамических характеристик осей медицинских роботов, обеспечивая получение воспроизводимых результатов. Экспериментальные исследования подтвердили её пригодность для тестирования осей медицинских роботов, что подчёркивает её значимость в задачах разработки подобных устройств.

Результаты испытаний выявили закономерность, согласно которой увеличение скорости вращения выходного фланца оси медицинского робота и внешнего момента инерции приводят к увеличению тормозного пути. Однако значительный разброс значений указывает на необходимость доработки программного обеспечения, используемого для обработки данных с углового датчика положения. Данный фактор связан с ограниченной частотой сбора данных и недостаточной точностью алгоритмов обработки.

В рамках дальнейших исследований планируется провести анализ возможностей модернизации программного обеспечения, отвечающего за регистрацию исследуемых характеристик. Особое внимание будет уделено повышению частоты дискретизации и оптимизации алгоритмов обработки данных, что позволит повысить качество анализа характеристик.

### Список источников:

1. Mesmer P., Riedel P., Lechler A., Verl A. Investigation and Compensation of Hysteresis in Robot Joints with Cycloidal Drives //MHI Colloquium. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 177-187.

### References:

1. Mesmer P., Riedel P., Lechler A., Verl A. Investigation and Compensation of Hysteresis in Robot Joints with Cycloidal Drives. In: Schüppstuhl T, Tracht K, Fleischer J, editors. Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2022. Proceedings of Colloquium ChamMHI 2022; Springer, Cham: Springer International Publishing: 2022. p. 177-187.

2. Min J. K., Yu H. S., Ahn K. H., Song J. B. Robot joint module equipped with joint torque sensor with disk-type coupling for torque error reduction //Intelligent Robotics and Applications: 8th International Conference, ICIRA 2015, Portsmouth, UK, August 24-27, 2015, Proceedings, Part I 8. – Springer International Publishing, 2015. – C. 371-378.

3. Егоров О.Д. Конструирование механизмов роботов. – Москва: Абрис, 2012. – 444 с.

4. Kończak M., Kukla M., Warguła Ł., Rybarczyk D., Wieczorek B. Considerations for the Design of a Wheelchair Dynamometer concerning a Dedicated Braking System // Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – №. 13. – C. 7447.

5. Shi Z., Li Y., Liu G. Adaptive torque estimation of robot joint with harmonic drive transmission // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – T. 96. – C. 1-15.

6. Zhang G., Tong Q., Zhang T., Tao J., Qiu A. Design of a High Torque Density Robot Joint and Analysis of Force Control Method Applied for a Light Exoskeleton // Electronics. – 2023. – T. 12. – №. 2. – C. 397.

### Информация об авторах:

#### Фролов Илья Александрович

Младший научный сотрудник НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, аспирант МГТУ «СТАНКИН».

#### Тарасов Денис Витальевич

Лаборант НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, магистрант МГТУ «СТАНКИН».

#### Воротников Андрей Александрович

Научный сотрудник НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, старший преподаватель МГТУ «СТАНКИН».

#### Подураев Юрий Викторович

Директор НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, доктор технических наук, профессор МГТУ «СТАНКИН».

2. Min JK, Yu HS, Ahn K.H., Song J.B. Robot Joint Module Equipped with Joint Torque Sensor with Disk-Type Coupling for Torque Error Reduction. In: Liu H, Kubota N, Zhu, X, Dillmann R, Zhou D, editors. Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Robotics and Applications: ICIRA 2015; 2015 Aug 24-27; Portsmouth, UK: Springer International Publishing: 2015; Part I, Section 8. p. 371-378.

3. Egorov O.D. Design of Robot Mechanisms. Moscow: Abris; 2012.

4. Kończak M., Kukla M., Warguła Ł., Rybarczyk D., Wieczorek B. Considerations for the Design of a Wheelchair Dynamometer Concerning a Dedicated Braking System. Applied Sciences. 2023;13(13):7447.

5. Shi Z., Li Y., Liu G. Adaptive Torque Estimation of Robot Joint with Harmonic Drive Transmission. Mechanical Systems and Signal Processing. 2017;96:1-15.

6. Zhang G., Tong Q., Zhang T., Tao J., Qiu A. Design of a High Torque Density Robot Joint and Analysis of Force Control Method Applied for a Light Exoskeleton. Electronics. 2023;12(2):397.

### Information about the authors:

#### Frolov Ilya Aleksandrovich

Junior Researcher at TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Postgraduate Student at Moscow State University of Technology «STANKIN».

#### Tarasov Denis Vitalievich

Laboratory Assistant at TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Master's Degree Student at Moscow State University of Technology «STANKIN».

#### Vorotnikov Andrey Aleksandrovich

Researcher at TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Senior Lecturer at Moscow State University of Technology «STANKIN».

#### Poduraev Yuriy Viktorovich

Director of TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at 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 23.02.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 19.05.2025.**

**The article was submitted 23.02.2025; approved after reviewing 18.03.2025; accepted for publication 19.05.2025.**

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

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

## Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.925.8:62-408.6

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-35-44

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, С ПОМОЩЬЮ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ

Елена Евгеньевна Биткина<sup>1✉</sup>, Антон Владимирович Шимохин<sup>2</sup>,

Елена Вячеславовна Николаева<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup> Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, г. Омск, Россия

<sup>3</sup> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>1</sup> ee.sh03@mail.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-7243-2174>

<sup>2</sup> shimokhin@yandex.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-2048-3180>

<sup>3</sup> nikolaeva\_eva@mail.ru

**Аннотация.** Интенсификация развития информационных технологий и систем автоматизированного проектирования непрерывно способствуют повышению уровня автоматизации при проектировании изделий различного назначения. Один из этапов жизненного цикла продукции это создание прототипа изделия. Для изготовления прототипа в настоящее время активно применяются аддитивные технологии и 3D моделирование. Однако при использовании данных технологий необходимо учитывать свойства пластика, а именно усадку, которая влияет на размеры прототипа изделия. Усадка влияет на размеры изделия, которые получаются после изготовления аддитивными методами. Таким образом, актуальность исследования заключается в разработке имитационной компьютерной модели, учитывающей параметры, влияющие на процесс изготовления прототипа изделия, и позволяющей изготовить модель, повышая точность ее изготовления. Для создания данной модели проведены исследования параметров, которые влияют на отклонение размеров изделия от заданных в 3D модели. В данной имитационной модели за исследуемые параметры взяты плотность заполнения и отклонение размеров от номинально заданных размеров детали. На основе полученных значений исследуемых параметров разработана математическая модель, которая дает возможность спрогнозировать значения отклонений размеров детали в зависимости от плотности заполнения. Разработанная имитационная модель позволит создавать 3D модель прототипа с размерами, в которые заложены отклонения на усадку, что повышает точность изготовления деталей методом аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** имитационная модель, аддитивные технологии, усадка пластика, математическая модель

**Для цитирования:** Биткина Е.Е., Шимохин А.В., Николаева Е.В. Моделирование процесса проектирования деталей, изготавляемых методом аддитивных технологий, с помощью создания имитационной модели изделия // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 35-44. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-35-44.

Original article

Open Access Article

# SIMULATING THE DESIGN PROCESS FOR PARTS MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES THROUGH CREATING AN IMITATION PRODUCT MODEL

Elena E. Bitkina<sup>1✉</sup>, Anton V. Shimokhin<sup>2</sup>, Elena V. Nikolaeva<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Omsk State Agrarian University Named After P.A. Stolypin, Omsk, Russia

<sup>3</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>1</sup> ee.sh03@mail.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-7243-2174>

<sup>2</sup> shimokhin@yandex.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-2048-3180>

<sup>3</sup> nikolaeva\_eva@mail.ru

**Abstract.** The continuous development of information technologies and automated design systems contributes to increasing automation levels in product design across various industries. One important stage in the product life cycle is creating prototypes. Currently, additive manufacturing techniques and 3D modelling are widely used for prototype production. However, when employing such methods, it is essential to consider material properties of plastics, particularly shrinkage, which affects the dimension of the prototype product. Shrinkage influences actual sizes of parts produced via additive processes compared to their initial designs. Therefore, the research aimed at developing a simulation-based computer model that accounts for factors influencing prototype fabrication accuracy becomes relevant. This study investigates key parameters affecting dimensional deviations from predefined values specified in CAD models. These include filling density and deviation from nominal dimensions. Based on the obtained values of the parameters under study, the authors develop a mathematical model enabling prediction of size variations depending on filling density. This simulation model will facilitate creation of 3D prototypes incorporating compensation for plastic shrinkage, thereby enhancing precision in producing components using additive manufacturing.

**Keywords:** simulation model, additive technologies, plastic shrinkage, mathematical model

**For citation:** Bitkina E.E., Shimokhin A.V., Nikolaeva E.V. Simulating the Design Process for Parts Manufactured Using Additive Technologies Through Creating an Imitation Product Model. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 35-44. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-35-44.

## Введение

Внедрение цифровых технологий на производство, в образовательный процесс и другие области позволило снизить стоимость оборудования и материалов для изготовления изделий посредством аддитивной печати. Модели, изготовленные с помощью аддитивных технологий, могут использоваться на различных производствах, что положительно влияет на развитие технологических решений [1 – 3]. Для 3D печати применяются различные материалы. Выбранный материал влияет как на эстетический вид изделия, так и на эксплуатационные свойства. Если эксплуатационные свойства позволяют, то можно говорить и о замене материала и метода изготовления деталей. Традиционный способ изготовления деталей отличается от аддитивного производства на нескольких циклах. В случае изготовления детали традиционным способом, применение 3D модели не обязательно, а при использовании аддитивных технологий электронная модель обязательна. В этом случае необходимо рассмотреть стадии жизненного цикла изделия. В соответствии с ГОСТ 53791-2010 в этапы жизненного цикла продукции производственно-технологического назначения входят проведение опытно-конструкторских работ, а также производство и испытание [3]. При выполнении этих двух пунктов необходимо учитывать назначение изделия, условия эксплуатации, материал и технологию изготовления. Материалы, которые применяются для изготовления, имеют свою особенность. Отличительной чертой аддитивной технологии является то, что необходимо учитывать отклонение размеров у изготовленного образца от электронной модели, которое возникает из-за усадки материала. Причем в случае применения метода 3D печати FDM следует учитывать, не только усадку, указанную производителем, но и дополнительную, которая возникает из того, что детали могут иметь разную степень заполнения, внутреннюю структуру, этим обусловлено исследование зависимости усадки от заполнения детали и создание имитационной модели, в которой учтены отклонения. Поэтому актуальным становится исследование по созданию имитационной электронной модели, в которой будут включены отклонения размеров прототипа от размеров 3D модели. Выявление отклонения размеров прототипа детали и задание их при проектировании электронной модели позволит разработать математическую модель, которая будет использоваться для

прогнозирования значения отклонения в зависимости от плотности заполнения. Проектировщику необходимо иметь значения допусков, которые надо закладывать на этапе проектирования 3D модели, чтобы изготовленная модель соответствовала техническому заданию. Совершенствование процесса автоматизированного проектирования и снижения количества рабочих образцов или готовых изделий с учетом выявленных параметров позволит повысить эффективность процессов использования материалов, с учетом современных способов изготовления деталей.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Аддитивное производство – процесс создания моделей практически любой формы на основе цифровой модели [4, 5]. Для изготовления модели применяются жидкие порошкообразные, бумажные или листовые материалы.

На рис. 1 представлены основные технологии аддитивного производства и материалы, которые используются для изготовления деталей. *Fused Deposition Modelling (FDM)* – технология нанесения послойного наплавления материала. Рабочая платформа перемещается по оси z, экструдер перемещается по осям x и y снизу вверх. Нити для печати могут быть пластиковые или металлические [6]. Также могут применяться пищевые материалы. *FDM*-печать одна из самых дешевых и простых, что делает ее популярной. Модели, которые созданы по технологии FDM, характеризуются упругостью и прочностью. Точность построения находится в пределах от 0,027 мм до 1 мм. Поверхность, напечатанная данным методом, как правило, слоистая. Данная технология наиболее доступная и популярная. Имеет как преимущества, так и определенные недостатки [7]. Для данного вида печати используются различные пластики, это и *PLA*, *ABC* и *PETG* и др.



Рис. 1. Основные технологии 3D печати и материалы  
Fig. 1. Basic 3D Printing Technologies and Materials

*Multi Jet Printing (MJP)* – моделирование методом многоструйной печати. Принцип основан на послойном построении модели из восковых или фотополимерных материалов. Применяется как правило для создания прототипов, моделей для испытаний, оснастки.

*Electron-beam freeform fabrication (EBF3)* – технология нагревания металлической нити до точки плавления с помощью электронного пучка высокой мощности. С помощью данного способа получается объекты, почти не отличающиеся от трехмерных цифровых моделей. Постобработка при таком способе не нужна.

*Laminated Object Manufacturing (LOM)* – технология печати объектов методом ламинирования, в которой используются тонколистовые материалы. Слои бумаги или другого материала последовательно склеиваются, а затем обрезаются по форме. Особенность данной печати заключается в том, что во время *LOM*-печати выделяется дым. Основное применение данного метода – создание прототипов и архитектурных макетов.

На качество печати влияет температура плавления, скорость печати, а также плотность заполнения. Данные параметры влияют на конечный продукт. Для создания имитационной модели и проведения исследований были выбраны следующие параметры: изменения значений геометрических параметров электронной модели и плотность заполнения.

Для создания математической модели, с помощью которой прогнозируется значение отклонения размеров изделия от заданных значений? изучалась усадка изделий, выполненных из пластика *PLA* в зависимости от плотности заполнения.

Достоинства *PLA*: низкая усадка, нетоксичен и биоразлагаемый. Недостатки *PLA*: со временем становится хрупким, нежелательная эксплуатация при высоких температурах, воздействии ультрафиолета и большие значения шероховатости, приводит к высокому трению [8, 9].

Изделия, которые изготавливаются по технологии *FDM*, могут быть подвержены усадке и деформации [10, 11]. Это наиболее распространенные дефекты, которые возникают в процессе послойного наплавления. В связи с тем, что наплавляемые нити охлаждаются с разной температурой, меняется и форма детали. Также на деформацию и усадку влияет плотность наполнения детали, так как образующиеся внутри перегородки будут иметь разные длины и толщину. Разные виды пластика по-разному деформируются. В связи с этим был проведен комплекс экспериментальных исследований, который позволил определить значение отклонений от заданного размера при изготовлении деталей технологией *FDM* и на основе полученных значений создана имитационная компьютерная модель в программе КОМПАС-3D. Для проведения исследования использовался принтер *FlashForgeDreamer*.

Для проведения эксперимента была выбрана цилиндрическая поверхность с отверстием, эскиз которой представлен на рис. 2, *a*.

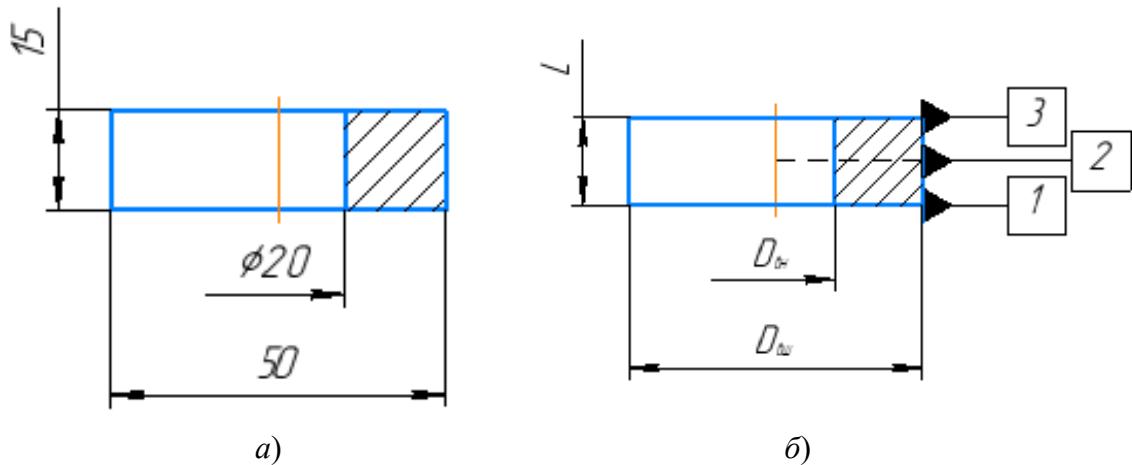


Рис. 2. Геометрические параметры заготовки  
*a* – размеры опытного образца (заготовки); *б* – условные параметры размеров образцов

*Fig. 2. Geometric parameters of the workpiece*  
*a* – dimensions of the prototype (workpiece); *b* – conventional parameters of the dimensions of the samples

Для изготовления образцов устанавливались следующие параметры печати: температура слоя –  $t_{\text{слоя}} = 0,2$  мм; форма заполнения – шестиугольники;  $S_{\text{печать}}$  – скорость печати, мм/сек; температура стола –  $t_{\text{стола}} = 65$  °C; температура пластика –  $t_{\text{пластика}} = 210$  °C;

Исследуемые параметры: наружный диаметр цилиндра с отверстием.

Измерения проводились в трех сечениях на разной высоте: 1 – внешний диаметр цилиндра, который соприкасается со столом (рис. 2, б); 2 – внешний диаметр цилиндра, на расстоянии 7,5 мм от стола (см. рис. 2, б); 3 – внешний диаметр цилиндра, на расстоянии 15 мм от стола (см. рис. 2, б).

В каждом сечении измерялись значения наружного диаметра ( $D_{\text{вн}}$ ), через каждые  $30^\circ$ .

## Результаты

В результате проведенных измерений получен массив данных, который позволил смоделировать процесс проектирования цилиндрической детали, которая изготавливается методом аддитивных технологий. В табл. 1. представлены размеры диаметров, измеренных в поперечном сечении в месте 2 (см. рис. 2) через каждые  $30^\circ$ . На основе полученных значений было установлено, что у образцов, имеются отклонения значений от номинально заданного размера.

Значения исследуемых параметров  
*Values of the parameters under study*

Таблица 1

*Table 1*

	Плотность заполнения, %										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	...	100
Наружный диаметр, цилиндра, сечение 2, $0^\circ$	49,75	49,55	49,48	49,83	49,59	49,63	49,97	49,99	49,99		49,90
Наружный диаметр, цилиндра, сечение 1, $30^\circ$	49,76	49,51	49,87	49,88	49,74	49,79	49,79	49,80	49,87		49,93
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Наружный диаметр, цилиндра, сечение 1, $150^\circ$	49,73	49,49	49,68	49,65	49,82	49,70	49,86	49,81	49,88		49,83

На основе экспериментальных данных построена диаграмма, представленная на рис. 3, которая демонстрирует значения диаметров у опытных образцов, измеренных во втором поперечном сечении, изготовленных из пластика *PLA* в зависимости от плотности заполнения.

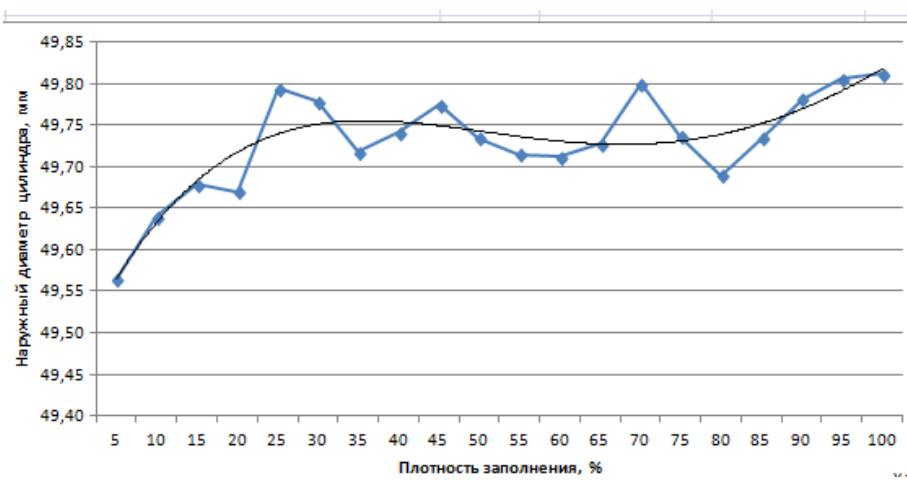


Рис. 3. Значения наружного диаметра цилиндра для образцов из пластика *PLA* в сечении 2  
*Fig. 3. Values of the outer diameter of the cylinder for PLA plastic samples in section 2*

В результате обработки данных получена полиномиальная зависимость, которая используется для определения значения размера цилиндрической поверхности, рассматриваемых образцов с наружным диаметром 50 мм, которая будет напечатана методом аддитивных технологий в зависимости от плотности заполнений:

$$f(D_{\text{вн}}) = 0,00001P_z^4 + 0,00059P_z^3 - 0,01252P_z^2 + 0,10189P_z + 49,47470. \quad (1)$$

Отклонение размера диаметра цилиндра от номинального диаметра при разной плотности заполнения находится с использованием формулы:

$$\Delta_{Pz} = D_{\text{ном}} - D_{\text{вн}}, \quad (2)$$

где  $D_{\text{ном}}$  – заданный внешний диаметр цилиндра, в данном эксперименте равен 50 мм.

Для определения среднего значения отклонения воспользуемся следующим выражением:

$$\bar{\Delta}_{Pz} = \frac{\sum \Delta_{Pz}}{6}. \quad (3)$$

Для оценки степени отклонения значения действительных размеров от среднего значения, находится среднеквадратическое отклонение, которое находится с помощью выражения:

$$S_{Pz} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta_{Pzi} - \bar{\Delta}_{Pz})_i^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где –  $n$  количество измеряемых значений диаметров, в данном эксперименте  $n = 6$ .

В результате проведенных вычислений найдены значения отклонений, которые возникают при изготовлении деталей методом *FDM* печати, и которые необходимо учитывать для работы с имитационной моделью с целью повышения точности изготовления деталей.

Поле допуска для образцов из материала PLA  
*Tolerance field for PLA samples*

Таблица 2

Table 2

Номер образца, материал PLA	Максимальное отклонение	Среднее значение отклонения	Среднеквадратическое отклонение	Поле допуска	Поле допуска по среднему значению отклонения
1	-0,68	0,44	0,202262206	h15	h14
2	-0,51	0,36	0,169941166	h14	h13
3	-0,56	0,32	0,191041008	h14	h13
4	-0,52	0,33	0,154402073	h14	h13
5	-0,41	0,20	0,127553910	h13	h12
6	-0,37	0,22	0,101472492	h13	h12
7	-0,48	0,28	0,181484618	h14	h13
8	-0,43	0,26	0,156896994	h14	h13
9	-0,42	0,23	0,164042677	h14	h12
10	-0,42	0,27	0,164772571	h14	h13
11	-0,48	0,29	0,172945078	h14	h13
12	-0,52	0,29	0,189675161	h14	h13
13	-0,46	0,27	0,160176985	h14	h13
14	-0,48	0,20	0,169705627	h14	h12
15	-0,49	0,26	0,162069944	h14	h13
16	-0,52	0,31	0,153101274	h14	h13
17	-0,49	0,27	0,143770651	h14	h13
18	-0,44	0,22	0,153025052	h14	h12
19	-0,42	0,19	0,146651514	h14	h12
20	-0,30	0,19	0,082320512	h13	h12

Для работы с имитационной моделью и создания компьютерной модели, которая позволит учитывать отклонения размеров при изготовлении физической модели построена зависимость, представленная на рис. 4. Данная диаграмма демонстрирует зависимость среднего значения отклонения размера цилиндрической поверхности от определенной плотности заполнения.

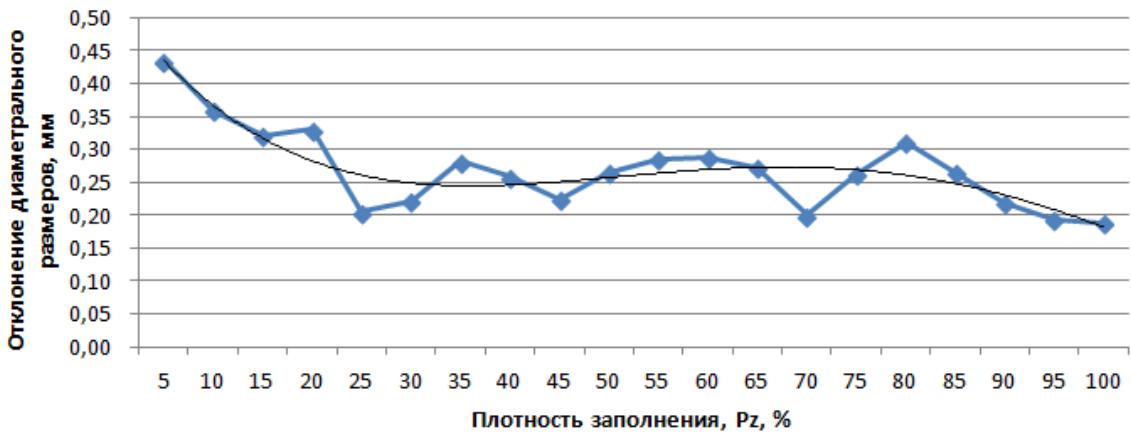


Рис. 4. Зависимость среднего значения отклонения номинального размера от плотности заполнения материала PLA

Fig. 4. Dependence of the average value of the nominal size deviation on the filling density of the PLA material

В результате проведенных исследований получена математическая модель, которая позволяет прогнозировать значение отклонений от номинального размера в зависимости от плотности заполнения изделия:

$$f(D_{\text{ном}}) = 0,00001 \cdot P_z^4 - 0,00059 P_z^3 + 0,0125 \cdot P_z^2 - 0,10189 \cdot P_z + 0,52530, \quad (4)$$

где  $P_z$  – плотность заполнения детали.

Применение данной математической модели дает возможность спрогнозировать усадку пластика PLA на 0,322 мм при 15 % плотности заполнения.

На рис. 5 представлена диаграмма, позволяющая оценить насколько значения отклонений могут отличаться от среднего значения. Данные для графика получены с использованием выражения (3).

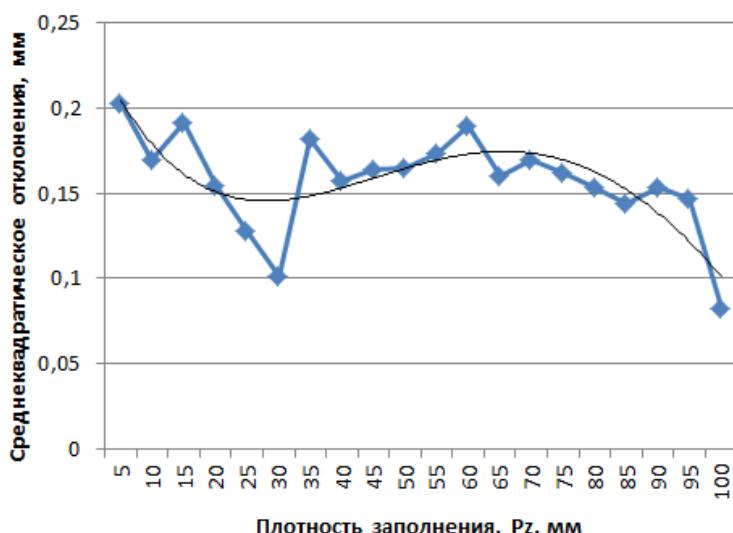


Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение размера в зависимости от плотности заполнения

Fig. 5. Standard deviation of size depending on filling density

На рис. 6 представлена блок-схема проектирования изделия без применения данной имитационной модели и с применением. Этапы проектирования и изготовления, которые определены штриховой линией, соответствуют применению имитационной модели. Проведенный эксперимент показал, что благодаря использованию имитационной модели, в которой учтены отклонения размеров детали от заданных размеров с учетом плотности заполнения опытный образец изготовили за 1 раз. В то время как без имитационной модели только с третьей попытки деталь получилась с размерами, удовлетворяющими отклонениям от заданных размеров.

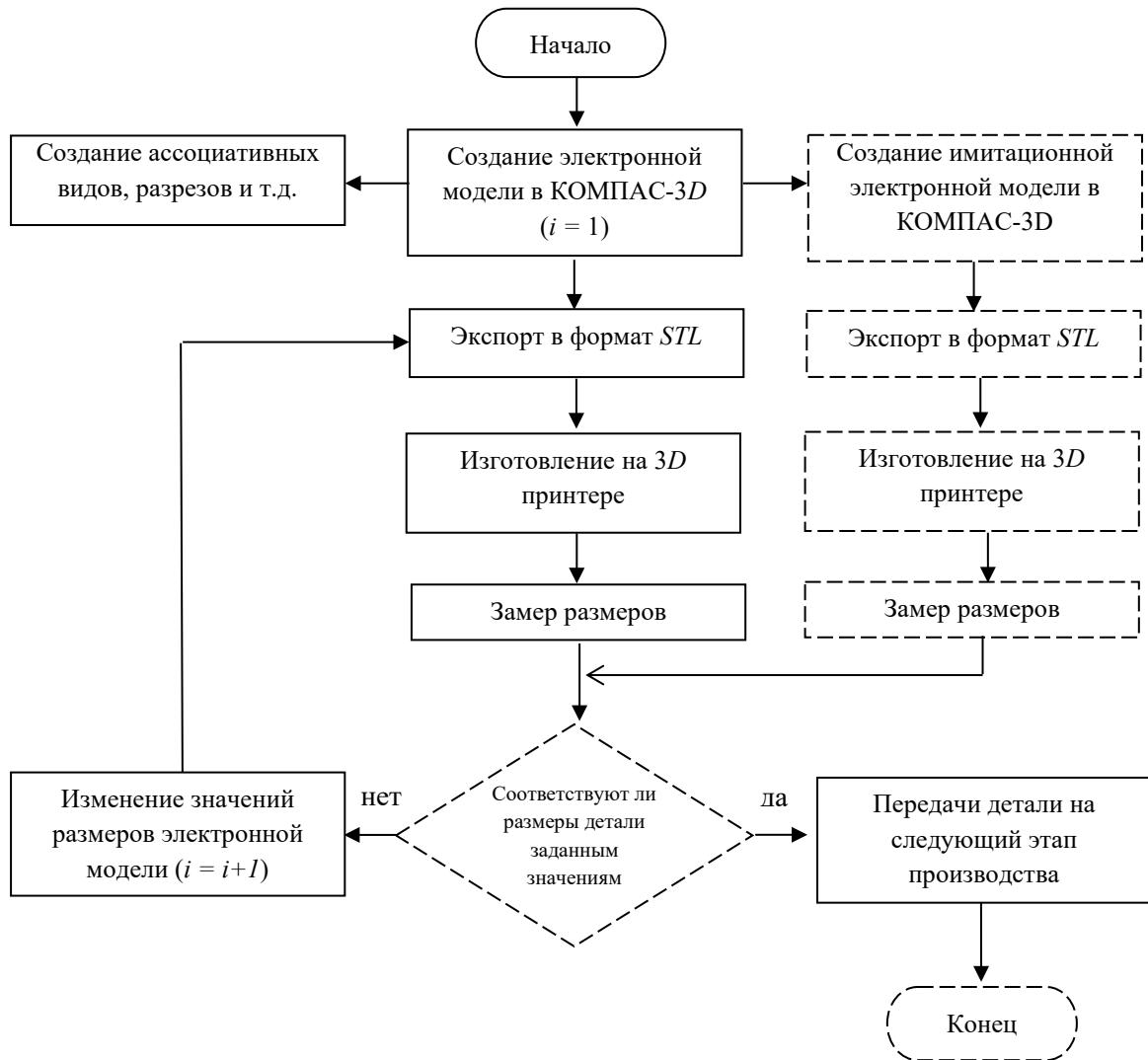


Рис. 6. Блок-схема автоматизации процесса проектирования детали, изготовленной методом аддитивных технологий

Fig. 6. Block diagram of automation of the design process of a part manufactured using additive technologies

## Заключение

В результате проведенной работы разработана имитационная модель, позволяющая смоделировать процесс проектирования прототипа цилиндрической детали, которая изготавливается по технологии *FDM*. Имитационная модель создается с размерами, в которых учтены отклонения размеров детали в связи с усадкой. Для обеспечения работоспособности данной модели проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить значения отклонений размеров детали от номинально заданных. На основе полученных данных разработана математическая модель, которая дает возможность спрогнозировать процесс усадки и определить значения отклонения размеров от номинальных. Которые необходимы для создания компьютерной модели. Данная математическая модель позволяет

определить значения отклонения размеров от номинально заданных в зависимости от плотности заполнения детали. Имитационная модель разработана для моделирования поверхности прототипов деталей, которые изготавливаются из пластика *PLA*. Данный способ актуален для повышения точности изготовления деталей. Практическое применение данной модели возможно в системах САПР, что позволит уменьшить время подготовки производства, получить деталь с требуемыми размерами методом *FDM* в меньшие сроки.

#### Список источников:

1. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия. URL: [https://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technology#.D0.A2.D0.B5.D1.85.D0.BD.D0.BE.D0.BB.D0.BE.D0.B3.D0.B8.D0.B8.20.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D0.B84](https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology#.D0.A2.D0.B5.D1.85.D0.BD.D0.BE.D0.BB.D0.BE.D0.B3.D0.B8.D0.B8.20.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D0.B84) (дата обращения 09.11.2021)
2. Биткина Е.Е., Таткало А.А., Тарануха И.И. О технологиях 3D печати // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях». – Омск. – 2021 – С. 208-212.
3. Семенова Е.Г., Махров Н.Г., Борисов С.Г. Внедрение новых методов цифровизации программно-аппаратных комплексов в аддитивном производстве // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. - №1. – С. 41-48.
4. ГОСТ 53791-2010 Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 8 с.
5. Шимохин А.В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции // Материалы по итогам научно-исследовательской деятельности Сер. 1 Техническая и естественнонаучная составляющие развития АПК. – Омск, 2021 – С. 775-779.
6. Тарануха И.И., Биткина Е.Е., Таткало А.А. К вопросу использования аддитивных технологий в машиностроении // Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК». – Омск, 2022. – С. 416-419.
7. Михальченко А.А., Невзорова А.Б. Повышение точности 3d-печати методом FDM путем изменения параметров 3D-принтера // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем: сборник научных трудов. – Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, 2023. – С. 140-143.
8. Елисейкин Е.И., Калачев О.Н. Влияние особенностей подготовки цифровой модели на качество поверхностей изделия в FDM 3D-печати // Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России: Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара, Нижневартовск, 06 апреля 2018 года. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2018. – С. 120-123.
9. Подробный гид по выбору пластика для 3D-печати URL:<https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlya-3d-pechati.html#pla> (дата обращения 10.01.2024)

#### References:

1. All About 3D Printing. Additive Manufacturing. Basic Concepts [Internet] [cited 2021 Nov 9]. Available from: [https://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technology#.D0.A2.D0.B5.D1.85.D0.BD.D0.BE.D0.BB.D0.BE.D0.B3.D0.B8.D0.B8.20.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D0.B84](https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology#.D0.A2.D0.B5.D1.85.D0.BD.D0.BE.D0.BB.D0.BE.D0.B3.D0.B8.D0.B8.20.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D0.B84)
2. Bitkina EE, Tatkalo AA, Taranukha II. About 3D Printing Technologies. In: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference on Innovative Technologies in the Agro Industrial Complex as a Factor in the Development of Science in Modern Conditions. Omsk: 2021. p. 208-212.
3. Semenova E.G., Makhrov N.G., Borisov S.G. Introduction of New Methods of Digitalization of Hardware and Software Systems in Additive Production. Automation and Modelling in Design and Management. 2019(1):41-48.
4. GOST 53791-2010 Resources Saving. Stages of Technological Cycle. General Principles. Moscow: Standartinform; 2021.
5. Shimokhin AV. Economic Substantiation of the Introduction of Additive Technology in the Technological Processes of Production of the Production of the Company. In: Proceedings of the Research Activity Results. Series 1: Technical and Natural Science Components of Agricultural Sector Development. Omsk: 2021. p. 775-779.
6. Taranukha II, Bitkina EE, Tatkalo AA. On the Use of Additive Technologies in Mechanical Engineering. In: Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference on Role of Students' Research Work in Developing Agriculture. Omsk: 2022. p. 416-419.
7. Mikhalkchenko AA, Nevzorova AB. Improving the Accuracy of FDM 3D Printing by Changing 3D Printer Parameters. In: Proceedings on Strategy and Tactics of Development of Production and Economic Systems. Gomel: Sukhoi State Technical University of Gomel: 2023. p. 140-143.
8. Eliseykin EI, Kalachev ON. Impact of Digital Model Preparation Features on Surface Quality in FDM 3D Printing. In: Proceedings of All-Russian International Scientific and Practical Seminar on Current Problems of Automation and Energy Saving in Fuel and Energy Complex of Russia; 2018 Apr 6; Nizhnevartovsk. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University: 2018. p. 120-123.
9. A Detailed Guide to Choosing Plastics for 3D Printing [Internet] [cited 2024 Jan 10]. Available from: <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlya-3d-pechati.html#pla>

10. Всё о PLA – самом популярном пластике для FDM-печати URL: <https://blog.iqb.ru/pla-plastic/>(дата обращения 10.01.2024)

11. Дворянкин О.А., Дворянкин А.О. Влияние режимов 3D-печати на усадку моделей изготавливаемых методами FDM печати // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 101-4. – С. 136-142.

12. Нефелов И.С., Баурова Н.И. Оценка структурных дефектов деталей, изготовленных при различных режимах 3D-печати // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2018. – № 8. – С. 29-32.

13. Печать ABS-пластиком – достоинства и недостатки URL:<https://additiv-tech.ru/publications/pechat-abs-plastikom-dostoinstva-i-nedostatki-materiala-dlya-3d-pechatи.html> (дата обращения 10.05.2024)

10. Everything About PLA – the Most Popular Plastic for FDM Printing [Internet] [cited 2024 Jan 10]. Available from: <https://blog.iqb.ru/pla-plastic/>

11. Dvoryankin O.A., Dvoryankin A.O. Effect of 3D Printing Settings on Shrinkage of Models Made by FDM Method. Trends in the Development of Science and Education. 2023;101-4:36-142.

12. Nefelov I.S., Baurova N.I. Evaluation of Structural Defects of Articles Obtained in Various Models of 3D Printing. All Materials: Encyclopaedic Reference Book. 2018;8:29-32.

13. Printing with ABS Plastic – Advantages and Disadvantages [Internet] [cited 2024 May 10]. Available from: <https://additiv-tech.ru/publications/pechat-abs-plastikom-dostoinstva-i-nedostatki-materiala-dlya-3d-pechatи.html>

### Информация об авторах:

#### **Биткина Елена Евгеньевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, ORCID ID: 0000-0002-7243-2174.

#### **Шимохин Антон Владимирович**

кандидат экономических наук, доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, ORCID ID:0000-0002-2048-3180.

#### **Николаева Елена Вячеславовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета.

### Information about the authors:

#### **Bitkina Elena Evgenievna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering of Omsk State Agrarian University Named After P.A. Stolypin, ORCID ID: 0000-0002-7243-2174.

#### **Shimokhin Anton Vladimirovich**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering of Omsk State Agrarian University Named After P.A. Stolypin, ORCID ID: 0000-0002-2048-3180.

#### **Nikolaeva Elena Vyacheslavovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Business, Standardization and Metrology of Omsk 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 24.10.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2024; принята к публикации 19.02.2025.**

**The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 12.11.2024; accepted for publication 19.02.2025.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.3:621.43

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-45-54

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОЙ РАБОТЫ ВАРИАТОРА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ

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.** Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечить надежную работы бесступенчатой трансмиссии автомобиля при аварийном отключении системы гидравлического управления. Целью работы является определение характеристик работы цепного вариатора бесступенчатой коробки передач (КП) без системы гидравлического управления. Метод проведения работы: компьютерное моделирование работы цепного вариатора. Новизна работы состоит в использовании дискретной модели контакта цепи с коническими шкивами вариатора с учетом изменения параметров трения. Результаты: разработана компьютерная динамическая модель для определения характеристик работы цепного вариатора бесступенчатой КП без системы гидравлического управления. Установлено, что при увеличении крутящего момента ведущего шкива отношение угловых скоростей шкивов также возрастает. Чтобы шкивы вариатора заняли положение максимального передаточного отношения пружина ведомого шкива должна создавать большую силу прижатия конусов к цепи, чем пружина ведущего шкива. Линии контакта осей цепи с поверхностью шкива не являются дугами окружности из-за упругой деформации контактирующих тел и изменения силы растяжения цепи в зоне контакта. В середине линии контакта цепи с ведущим шкивом расстояния от цепи до оси шкива уменьшается. Расстояние от цепи до оси ведомого шкива на линии контакта уменьшается по мере увеличения силы растяжения цепи.

**Ключевые слова:** коробка передач, цепной вариатор, multitronic, компьютерное моделирование, «универсальный механизм»

**Для цитирования:** Реутов А.А. Моделирование аварийной работы вариатора коробки передач автомобиля // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 45-54. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-45-54.

Original article

Open Access Article

## SIMULATION OF EMERGENCY OPERATION OF VEHICLE GEARBOX VARIATOR

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 relevance of the work stems from the necessity to ensure reliable functioning of a continuously variable transmission (CVT) under emergency conditions, particularly when the hydraulic control system fails. The aim of the study is to define the operational characteristics of a chain-type variator of CVT without hydraulic control. The method of the work is computer modelling of the chain variator. The novelty of the work lies in utilizing a discrete contact model between the chain and conical pulleys of the variator, accounting for variations in friction parameters. As a result, a computer dynamic model is developed to evaluate the performance characteristics of a chain-type variator in a continuously variable gearbox lacking hydraulic control. The author finds that increasing torque on the driving pulley leads to increased angular velocity ratio between the pulleys. For the pulleys to reach maximum gear ratio position, the spring force pressing the cones against the chain must be greater on the driven pulley compared to the driving pulley. Contact lines between the chain axes and pulley surfaces do not follow circular arcs due to elastic deformation of contact bodies and changes in chain tension force in the contact zone. Midway along the line of contact between the chain and the driving pulley, the distance from the chain to the pulley axis decreases. Similarly, the distance from the chain to the axis of the driven pulley diminishes as chain tension force increases.

**Keywords:** gearbox, chain variator, multitronic, computer modelling, «universal mechanism»

**For citation:** Reutov A.A. Simulation of Emergency Operation of Vehicle Gearbox Variator. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 45-54. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-45-54.

---

## Введение

За последние три десятилетия многие производители наладили выпуск более 50 моделей легковых автомобилей с бесступенчатой трансмиссией на основе цепного или ременного вариатора. Помимо плавного движения автомобиля, главным преимуществом бесступенчатой трансмиссии является непрерывное, а не дискретное, изменение передаточного отношения коробки передач (КП), что лучше соответствует непрерывному изменению крутящего момента двигателя внутреннего сгорания (ДВС). К недостаткам бесступенчатой трансмиссии с вариатором относят ограничение передаваемого крутящего момента, меньшие динамичность и коэффициент полезного действия (КПД) по сравнению с механической и автоматической КП.

Много научных работ посвящено улучшению характеристик бесступенчатых трансмиссий, в том числе повышению КПД за счет оптимизации управления вариатором, снижения потерь на трение [1 – 3].

Цепные и ременные автомобильные вариаторы относятся к классу механических фрикционных передач гибкой связью, началом научного изучения которых принято считать объявление Леонардом Эйлером в 1775 г. закона передачи усилия гибкой лентой посредством сил трения [4]. Л. Эйлер рассматривал невесомую, абсолютно гибкую и нерастяжимую нить, перекинутую через неподвижный шкив, под действием приложенных к ее концам сил. Уравнения Эйлера связывает приложенные силы в предположении, что нить скользит на всей дуге контакта со шкивом.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия ремня со шкивом проведены за прошедшие два с половиной столетия. Причиной интенсивных исследований фрикционных приводов с гибкой связью стало внедрение паровых машин с ременными передачами в промышленности. Для создания более эффективных ременных передач исследователи совершенствовали математические модели, учитывали силы инерции движущихся тел, изгибную жесткость гибкой связи, зависимость силы трения от параметров контакта, аэродинамический эффект и другие факторы.

Цепи разных моделей вариаторов реализуют дискретный контакт 70...90 стальных осей с поверхностями шкивов (цепь *multitronic 01J* имеет 76 осей), а ремни – дискретный контакт около 400 стальных пластин. Площадь контакта ремня с шкивами значительно больше, чем цепи.

В [5] рассмотрено движение дискретного элемента ленты по поверхности приводного барабана. Зависимость силы трения ленты по поверхности барабана от скорости скольжения представлена степенным рядом. Составлено уравнение автоколебаний ленты с учетом центробежной и кориолисовой сил инерции при постоянной угловой скорости вращения барабана. Получено численное решение уравнения автоколебаний, показавшее, что скорость скольжения ленты возрастает с ростом угловой скорости барабана. В [6] получена система двух нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих автоколебания ленты и приводного барабана с асинхронным электроприводом. Получено аналитическое решение для стационарного режима работы привода.

Цепные и ременные автомобильные вариаторы имеют существенные отличия от традиционных клиноременных передач, не позволяющие использовать разработанные для клиноременных передач математические модели и зависимости.

К наиболее значимым отличиям автомобильных вариаторов от клиноременных передач можно отнести:

- виды контакта ремня (цепи) со шкивами – дискретный и непрерывный;
- виды трения между ремнем (цепью) и шкивами;
- способ натяжения ремня (цепи);
- способ регулирования передаточного отношения вариатора.

В отличии от клиноременных передач натяжение ремня (цепи) вариатора не задают перемещением одного из шкивов или натяжного ролика. Передаточное отношение вариатора, т.е. радиусы дуг контакта шкивов с ремнем (цепью), регулируют силами прижатия конусов шкивов к ремню (цепи). В результате возможно сжатие одной из ветвей ремня (цепи), а сжатие ветви клиноременной передачи недопустимо.

Стационарный и переходные режимы работы бесступенчатой трансмиссии исследованы

в [7], но переходные процессы рассмотрены без нагрузки. Эксперименты проведены для верификации теоретической модели. В [8] рассмотрена возможность оптимизации бесступенчатой трансмиссии посредством контроля скольжения вариатора. В [9] представлена математическая модель бесступенчатой трансмиссии с ременным вариатором, учитывая упругую деформацию шкивов. Моделирование показало большое снижение КПД при переходных процессах. Экспериментально измеренный крутящий момент на 10...15 % меньше расчетных значений. Метод конечных элементов для оценки упругой деформации шкивов использовали в работах [9 – 11].

Потери мощности в начале и конце контакта осей цепи со шкивом, скольжение цепи на шкиве в радиальном направлении также рассмотрены в [9]. В [12] была разработана эмпирическая модель расчета снижения передаваемого крутящего момента за счет сопротивления при входе звеньев цепи в контакт со шкивом и выходе цепи из контакта. В [13] предложена модель скольжения ленты на шкивах, основанная на теории эластогидродинамического трения.

В [14, 15] отмечают, что периодический контакт осей цепи со шкивами вызывает периодическое движение всей цепи и шум, зависящие от формы звеньев и шага цепи. Авторы [16] создали плоскую многомассовую модель цепного вариатора и исследовали влияние трения и зазоров на динамические показатели при больших крутящих моментах. Отмечено сильное влияние трения и зазоров на характеристики работы вариатора, снижение передаваемой мощности, увеличение неравномерности движения. Однако в работе не проведен математический анализ зависимости неравномерности движения от параметров трения.

В [17] предложили трехмерную динамическую модель цепного вариатора с учетом перекоса и упругой деформации шкивов. Авторы показали, что даже небольшой перекос шкива вызывает значительное растяжение цепи.

В [19] отмечают, что скольжение цепи на шкивах является решающим фактором, определяющим энергетические потери и износ вариатора. Скольжение цепи зависит от сил сжатия конусов шкивов и передаваемого крутящего момента. Большие силы сжатия конусов шкивов приводят к снижению КПД вариатора. В [20] отмечают, что скольжение ремня вариатора можно разделить на две составляющие: макроскольжение и микроскольжение. Макроскольжение в основном зависит от скорости ремня, микроскольжение зависит от сил прижатия конусов шкивов к цепи и крутящего момента.

Целью работы является определение характеристик работы цепного вариатора бесступенчатой КП без системы гидравлического управления.

### Описание работы КП с цепным вариатором

Бесступенчатая автоматическая КП *Multitronic* компании *Audi* содержит вариатор, состоящий из ведущего и ведомого шкивов, натянутой между ними специальной цепи [21]. Каждый шкив содержит пару конусов. Поскольку один конус каждого шкива подвижный, радиусы контакта цепи с шкивами и передаточное отношение вариатора плавно изменяются.

В автомобилях *Audi* с бесступенчатой КП *multitronic* 01J [22] демпфер крутильных колебаний соединяет коленвал ДВС с солнечным валом планетарного механизма (ПМ). Ведущий шкив вариатора соединен с водилом ПМ промежуточной одноступенчатой зубчатой передачей. Крутящий момент с ведущего шкива передается цепью на ведомый шкив и далее через главную коническую передачу на дифференциал ведущих колес автомобиля.

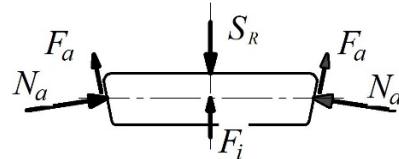
Цепь вариатора состоит из рядов пластин, соединенных составными осями. Через каждый ряд пластин проходят две составных оси. Каждая из двух частей составных осей неподвижно соединена с одним рядом пластин. Крутящий момент с ведущего шкива на ведомый передается за счет сил трения между торцами осей и рабочими поверхностями шкивов.

Каждый из шкивов имеет один гидроцилиндр для прижимания конусов к цепи (прижимные гидроцилиндры) и один гидроцилиндр для изменения передаточного отношения (регулировочные гидроцилиндры). Помимо гидроцилиндров тарельчатая и винтовая пружины поджимают цепь к рабочим поверхностям шкивов. При отсутствии давления в гидравлической системе пружины устанавливают конусы шкивов в положение максимального передаточного отношения.

Будем считать контакт торцов составных осей цепи с поверхностью конусов шкива точечным, а расстояние от точек контакта до оси шкива одинаковыми. Обозначим расстояние от

точек контакта цепи с ведущим шкивом до его оси  $R_1$ , а от точек контакта цепи с ведомым шкивом до оси ведомого шкива  $R_2$ . Поскольку стальная цепь практически нерастяжима, увеличение  $R_1$  возможно при уменьшении  $R_2$  и наоборот. Размеры ведущего и ведомого шкивов, минимальное и максимальное значения  $R_1$  и  $R_2$  одинаковы:  $R_{\min} = 0,03$  м;  $R_{\max} = 0,72$  м.

На рис. 1 показана схема действия сил на ось цепи при контакте с коническими поверхностями шкива (проекция на плоскость, проходящую через ось вращения шкива):  $N_a$  – нормальная сила контакта оси с шкивом,  $F_a$  – сила трения в контакте оси с шкивом,  $S_R$  – радиальная составляющая силы растяжения цепи,  $F_i$  – центробежная сила инерции.



**Рис. 1. Схема действия сил на ось цепи при контакте с коническими поверхностями шкива (проекция на плоскость, проходящую через ось вращения шкива)**

*Fig. 1. Diagram of the action of forces on the chain axis when in contact with the conical surfaces of the pulley (projection onto a plane passing through the axis of rotation of the pulley)*

Обозначим осевые силы прижатия конусов ведущего и ведомого шкивов к цепи  $N_1$  и  $N_2$  (направлены вдоль осей вращения шкивов),  $M_1$  и  $M_2$  – крутящие моменты, передаваемые ведущим и ведомым шкивами цепи. Тогда:

$$M_1 \approx 2f_1 N_1 R_1 / \cos\gamma \text{ и } M_2 \approx 2f_2 N_2 R_2 / \cos\gamma, \quad (1)$$

где  $f_1, f_2$  – эквивалентные коэффициенты трения цепи по поверхностям ведущего и ведомого шкивов,  $\gamma$  – угол между образующей поверхности контакта шкива с цепью и перпендикуляром к оси шкива.

Для предотвращения заклинивания цепи между коническими поверхностями шкивов угол  $\gamma$  должен соответствовать условию:

$$\operatorname{tg}(\gamma) > \max\{f_1, f_2\}. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования [23, 24] показали, что при разных маслах и режимах работы среднее значение коэффициента трения может изменяться в интервале 0,072...0,091 и соответствуют (2). При увеличении скольжения (отношения средних величин скоростей точек контакта ведущего и ведомого шкивов с цепью) от 1 до 1,02 коэффициент трения возрастает, при дальнейшем увеличении скольжения коэффициент трения уменьшается.

При малом проскальзывании цепи на шкивах, пренебрегая потерей мощности в контактах цепи со шкивами, примем  $M_2 \approx M_1 R_2 / R_1$  и из (1) получим:

$$N_1 \approx N_2 \approx (M_1 \cos\gamma) / (2f_1 R_1).$$

Тогда максимальные необходимые величины сил  $N_1$  и  $N_2$  без учета проскальзывания цепи на шкивах примерно одинаковы и определяются формулой:

$$N_1 \approx N_2 \approx \max(M_1) \cos\gamma / (2f_1 R_{\min}). \quad (3)$$

Вычислим приблизительные величины осевых сил  $N_1$  и  $N_2$  для вариатора КП *multitronic 01J* со следующими параметрами:  $\max(M_1) = 77,5$  Нм,  $\gamma = 11^\circ$ ,  $f_1 = 0,1$ ,  $R_{\min} = 0,03$  м.

Согласно формуле (3)  $N_1 \approx N_2 \approx 12,68$  кН.

Работой вариатора КП *multitronic* управляет двухконтурная гидравлическая система. Если фактическое давление масла в гидросистеме значительно превышает заданное значение, то предохранительный электромагнитный клапан перекрывает подачу масла в гидросистему управления. При неисправности гидравлической системы управления КП (при отсутствии давления в гидросистеме) подвижные конусы ведущего и ведомого шкивов прижимают к цепи трельчатая и винтовая пружины. Под действием пружин шкивы вариатора устанавливаются в положение максимального передаточного отношения ( $R_1 \rightarrow R_{\min}$ ,  $R_2 \rightarrow R_{\max}$ ) [22].

Один конец винтовой пружины и одна кромка тарельчатой пружины закреплены на валах вариатора. Другие конец и кромка пружин перемещаются вместе с подвижными конусами. Максимальное передаточное отношение вариатора соответствует максимальному раздвижению половин ведущего шкива и максимальному сближению половин ведомого шкива. Поэтому рабочая (наибольшая) деформация тарельчатой пружины соответствует  $R_1 = R_{\min}$  и максимальному перемещению подвижной половины ведущего шкива:

$$\Delta_{\max} = 2(R_{\max} - R_{\min}) \operatorname{tg}\gamma.$$

При  $R_1 = R_{\max}$  деформация тарельчатой пружины минимальна.

При линейной силовой характеристике тарельчатой пружины:

$$N_1 = C_{s1}(\Delta + \Delta_{10}),$$

где  $C_{s1}$  – жесткость тарельчатой пружины;  $\Delta_{10}$  – предварительная деформация тарельчатой пружины, соответствующая  $R_1 = R_{\max}$ ;  $\Delta$  – дополнительная деформация тарельчатой пружины при  $R_{\min} \leq R_1 \leq R_{\max}$ .

Для создания требуемой величины силы  $N_1$  жесткость тарельчатой пружины должна соответствовать условию:

$$C_{s1} = N_1 / (\Delta_{\max} + \Delta_{10}).$$

Деформация винтовой пружины  $\Delta_{20}$ , соответствующая максимальному сближению половины ведомого шкива ( $R_2 = R_{\max}$ ) является минимальной. Наибольшая деформация сжатия винтовой пружины соответствует максимальному раздвижению половины ведомого шкива ( $R_2 = R_{\min}$ ). Для создания требуемой величины силы  $N_2$  жесткость винтовой пружины должна соответствовать условию:

$$C_{s2} = N_2 / \Delta_{20}.$$

Для указанных выше параметров вариатора КП *multitronic 01J* при  $\Delta_{10} = 2$  мм;  $\Delta_{20} = 10$  мм;  $\Delta_{\max} = 16,3$  мм;  $C_{s1} \geq 692$  кН/м;  $C_{s2} \geq 1268$  кН/м.

### Описание компьютерной УМ-модели вариатора

Для определения характеристик работы бесступенчатой КП без системы гидравлического управления создадим компьютерную модель цепного вариатора использованием программного комплекса «универсальный механизм» (УМ-модель) [25].

УМ-модель включает конусы ведущего и ведомого шкивов вариатора, вращающихся относительно своих ползунов, которые перемещающихся относительно неподвижного корпуса КП в направлении оси  $x$  (рис. 2).

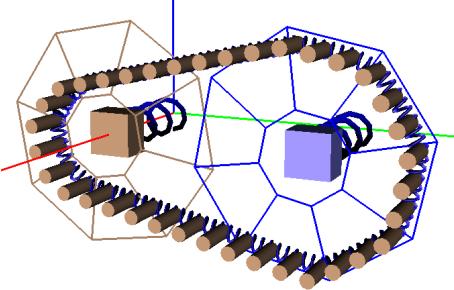


Рис. 2. УМ-модель цепного вариатора  
Fig. 2. UM-model of a chain variator

Приведенный момент инерции ведущего шкива  $J_1$  учитывает также инерционные свойства ДВС, ПМ и промежуточной передачи. Приведенный момент инерции ведомого шкива  $J_2$  представляет инерционные свойства главной передачи, колес и кузова автомобиля.

К конусам приложены шарнирные моменты  $M_1$  и  $M_2$ . Крутящий момент ведущего шкива  $M_1$  может быть задан функцией времени  $t$  и другими параметрами модели. Момент ведомого шкива представлен зависимостью:

$$M_2 = M_{C0} + M_{C2}\omega_2,$$

где  $M_{C0}$  и  $M_{C2}$  – коэффициенты сопротивления вращению ведомого шкива;  $\omega_2$  – угловая скорость ведомого шкива.

На ползуны ведущего и ведомого шкивов действуют шарнирные силы соответствующих пружин  $N_1$  или  $N_2$ , линейно зависящие от перемещения и скорости ползуна.

Замкнутая цепь вариатора представлена 36 телами (ТЦ), соединенными упруго-диссипативными элементами (УДЭ). В УМ-модели ТЦ пронумерованы последовательно с № 1 до № 36.

Каждое ТЦ имеет 2 степени свободы – возможные перемещения в направлении осей  $y$  и  $z$ . Перемещения ТЦ в направлении оси  $x$  отсутствуют.

Контактное взаимодействие цепи с шкивами (ТЦ с конусами) представлено контактными силами «точки- $Z$  поверхность» [25]. Силы трения  $F_a$  осей цепи по поверхности шкивов

пропорциональны нормальным реакциям  $N_a$  контактирующих тел и направлены противоположно скорости скольжения.

Величина силы трения покоя определяется коэффициентами трения сцепления  $f_0$ , контактной жесткости  $C_n$  и контактной диссипации  $C_d$ . Величина силы трения скольжения определяется коэффициентами трения скольжения  $f_\infty$ , скоростью скольжения  $v_{str}$ , определяющей интервал экспоненциального снижения коэффициента трения, эмпирическим показателем степени  $\delta$ , коэффициентом вязкого трения  $\nu$ . Переход от трения скольжения к трению покоя происходит, когда скорость скольжения меняет направление на противоположное.

Каждая ось цепи вариатора имеет 2 точки контакта с шкивом, поэтому силы пружины  $N_1$  и  $N_2$  и жесткости пружин в УМ-модели должны быть в два раза больше реальных значений.

УМ-модель цепного вариатора имеет следующие параметры (все величины далее указаны в единицах международной системы):

- $R_{min} = 0,03$ ,  $R_{max} = 0,072$ ,  $\gamma = 11^\circ$ ;
- расстояние между осями шкивов – 0,146; длина нерастянутой цепи 0,6154 равна длине замкнутого контура при  $R_1 = R_2 = 0,054$ ;
- количество ТЦ – 36, масса ТЦ – 0,086. Жесткость и коэффициент диссипации УДЭ при растяжении – 1,25E8 и 5,6;
- коэффициенты  $f_{C0} = 0,095$  и  $f_\infty = 0,09$ ;  $v_{str} = 0,01$ ,  $\delta = 1$ ;  $\nu_0 = 0,122$ ;  $C_n = 1,0E7$ ;  $C_d = 1,0E4$ .  $C_{s1} = 1,12E5$  или  $1,52E5$ ;  $C_{s2} = 1,52E5$ ;  $M_{C0} = 0,001$ ;  $M_{C1} = 2,8$ ;
- коэффициент сопротивления перемещению ползуна  $\mu = 1000$ ;
- приведенные моменты инерции шкивов  $J_1 = 1$ ;  $J_2 = 10$ .

### Результаты моделирования

Проведено моделирование разгона автомобиля при плавном увеличении крутящего момента ведущего шкива  $M_1$  от 0 до  $M^*$  за первые 4 с и дальнейшего движения с постоянным моментом  $M_1 = M^*$ .

В табл. 1 приведены средние величины характеристик моделируемого процесса ( $N_1$  и  $N_2$ ,  $M_1$  и  $M_2$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) после завершения этапа разгона, т.е. при  $t \in [6, 8]$  с (когда  $M_1 = M^*$  и переходные процессы завершились).

Таблица 1

Результаты моделирования

Table 1

Simulation results

№	$N_1/N_2$	$M_1/M_2$	$\omega_1/\omega_2$	$V_{m1}/V_{m2}$	$V_{s1}/V_{s2}$	$R_1/R_2$	$i_M$	$i_R$	$i_\omega$
1	13960/ 14480	40/86,6	72,5/ 31,3	-0,0115/ 0,0097	0,039/ 0,025	0,0299/ 0,0690	2,16	2,31	2,32
2	13420/ 14830	60/130,2	120,9/ 46,3	-0,0605/ 0,0762	0,146/ 0,111	0,0300/ 0,0688	2,17	2,29	2,61
3	14780/ 15240	77/168	164/59	-0,0865/ 0,1391	0,215/ 0,205	0,0299/ 0,0687	2,18	2,30	2,78
4	12960/ 12500	60/88,2	53/31,6	-0,0220/ 0,0288	0,069/ 0,044	0,0400/ 0,0611	1,47	1,53	1,68
5	17700/ 16770	60/108,2	77,9/ 37,7	-0,0191/ 0,0259	0,051/ 0,063	0,0344/ 0,0660	1,80	1,92	2,07

Примечание:  $R_1$  и  $R_2$  – средние величины расстояний от точек контакта ТЦ № 20 до осей ведущего и ведомого шкивов во время контакта;  $V_{m1}$  и  $V_{m2}$  – средние величины скорости скольжения ТЦ № 20 на ведущем и ведомом шкивах;  $V_{s1}$  и  $V_{s2}$  – средние квадратические отклонения (СКО) скорости скольжения ТЦ № 20 на ведущем и ведомом шкивах;  $i_M = M_2/M_1$ ,  $i_R = R_1/R_2$ ,  $i_\omega = \omega_1/\omega_2$ .

Расстояния  $R_1$  и  $R_2$  без учета упругих деформаций контакта в данной УМ-модели можно вычислить через координаты ползунов  $x_{si}$  по формуле:

$$R_i = 0,072 - (0,1 - x_{si})/\operatorname{tg}\gamma, i = 1, 2.$$

При близких значениях сил  $N_1 \approx N_2$  или  $N_1 > N_2$  расстояние от ТЦ до осей шкивов  $R_1$  и  $R_2$  не достигают предельных значений  $R_{min}$  и  $R_{max}$ , а передаточное отношение вариатора не достигает максимальной величины (табл. 1, строки 4, 5). Чтобы шкивы вариатора заняли положение максимального передаточного отношения винтовая пружина ведомого шкива должна созда-

вать большую силу прижатия конусов к цепи, например, иметь большую жесткость, чем тарельчатая пружина ведущего шкива. Таким образом компьютерное моделирование показало, что величины сил  $N_1$  и  $N_2$ , рассчитываемые по формуле (2) не обеспечивают максимальную величину передаточного отношения вариатора.

На рис. 3 показаны графики изменения отношения угловых скоростей ведущего и ведомого шкивов  $i_\omega$  во времени при  $M^* = 40, 60$  и  $77$ .

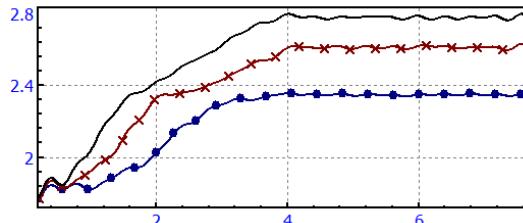


Рис. 3. Графики изменения отношения угловых скоростей  $i_\omega$  во времени при  $M^* = 40$  (маркированная кружками линия),  $M^* = 60$  (маркированная крестиками линия),  $M^* = 77$  (ненаркированная линия)

Fig. 3. Graphs of the change in the ratio of angular velocities  $i_\omega$  over time at  $M^* = 40$  (line marked with circles),  $M^* = 60$  (line marked with crosses),  $M^* = 77$  (unmarked line)

При разгоне автомобиля и плавном увеличении крутящего момента ведущего шкива  $M_1$  отношение угловых скоростей  $i_\omega$  также плавно возрастает. При увеличении момента  $M^*$  с 40 до 77 величина  $i_\omega$  возрастает с 2,32 до 2,78, а отношение  $i_M$  увеличилось незначительно – с 2,16 до 2,18. Отношение  $i_\omega/M^*$  при постоянной величине  $M_1 \in [40; 77]$  уменьшилось с 0,058 до 0,036 из-за проскальзывания цепи на шкивах.

Также из-за скольжения цепи на шкивах отношения  $i_R$ ,  $i_M$  и  $i_\omega$  в результатах моделирования не равны. Величина  $i_R$  занимает промежуточное значение между  $i_M$  и  $i_\omega$ .

Средние величины  $V_m$  и СКО  $V_s$  скорости скольжения цепи на шкивах увеличиваются при увеличении момента  $M^*$ . Ведущий шкив обгоняет цепь, а ведомый шкив отстает от цепи. Из-за большой жесткости цепи скольжение происходит на всей дуге охвата, дуги сцепления цепи со шкивами отсутствуют.

В [26] отмечено, что при фрикционном контакте с приводным шкивом движение гибкого тела (цепи) носит немонотонный характер с нерегулярными волновыми смещениями относительно поверхности шкива. Волны растяжения-сжатия гибкого тела на дуге охвата идентифицированы через расстояния между соседними дискретными телами.

Для оценки характера движения цепи на шкивах вычислим расстояния ТЦ от осей шкивов, а также расстояния между соседними ТЦ (длины УДЭ).

На рис. 4 приведен график изменения расстояния  $R_1$  ТЦ № 20 до оси ведущего шкива во время контакта при  $M^* = 77$ .

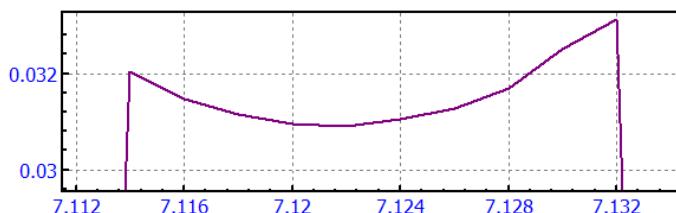


Рис. 4. График изменения расстояния  $R_1$  ТЦ № 20 до оси ведущего шкива во время контакта при  $M^* = 77$

Fig. 4. Graph of change in distance  $R_1$  of TC № 20 to the axis of the driving pulley during contact at  $M^* = 77$

Расстояние  $R_1$  ТЦ № 20 во время контакта с ведущим шкивом изменяется от 0,032 в начале контакта до 0,031 в середине и до 0,033 в конце дуги контакта. То есть линия контакта ТЦ с поверхностью шкива не является дугой окружности. Причиной изменения расстояния  $R_1$  является упругая деформация контактирующих тел. Характер изменения  $R_1$  сохраняется на протяжении всего времени моделирования.

Расстояние  $R_2$  ТЦ № 20 во время контакта с ведомым шкивом также изменяется: уменьшается с увеличением силы растяжения цепи. Размах изменения  $R_2$  достигает 0,0025...0,0031 при  $M^* = 40$  и 0,0040...0,0047 при  $M^* = 60...77$ .

Максимальное  $S_{\max}$  и минимальное  $S_{\min}$  значения силы растяжения цепи вычислим через

усредненные для четырех УДЭ средние величины  $S_m$  и СКО  $S_s$  силы растяжения цепи.

$$S_{\max} = S_m + S_s; S_{\min} = S_m - S_s.$$

Разница значений  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  возрастает при увеличении момента  $M_1$ .

При  $M_1 = 40 - S_{\max} = 1622, S_{\min} = 865$ . При  $M_1 = 77 - S_{\max} = 2180, S_{\min} = 238$ .

В рассмотренных примерах цепь остается растянутой на обеих ветвях.

Проведено моделирование нестационарного режима работы вариатора в виде разгона автомобиля с разной скоростью увеличения крутящего момента ведущего шкива  $M_1$  от 0 до 60 за время 4 и 8 с. Во время ускоренного разгона автомобиля на ведомый шкив вариатора помимо момента сопротивления  $M_2$  действует момент сил инерции, пропорциональный ускорению автомобиля. Это изменяет параметры динамического равновесия вариатора и может вызвать повышенное проскальзывание цепи. Для рассмотренного примера увеличения скорости нарастания крутящего момента  $M_1$  от 7,5 до 20 Нм/с не приводит к заметному увеличению средних значений скорости скольжения цепи на ведущем и ведомом шкивах. После завершения этапа разгона характеристики стационарной работы вариатора совпадают с значениями табл. 1.

Моделирование разгона автомобиля при синусоидальном изменении крутящего момента ведущего шкива:

$$M_1 = M^* + M_{1s} \sin(k_1 t),$$

показало, что при  $M^* = 60$ , амплитуде  $M_{1s} = 15$  и круговой частоте  $k_1 = 6,28$  ТЦ удаляются на недопустимо большое расстояние от оси ведомого шкива  $R_1 = 0,074$ , что свидетельствует о недостаточном прижатии конуса ведомого шкива к цепи. Таким образом, силы инерции, возникающие при ускорениях автомобиля, требуют увеличения сил  $N_1$  и  $N_2$  по сравнению с значениями по формулам (2). Синусоидальное изменение крутящего момента ведущего шкива  $M_1$  приводит к синусоидальному изменению угловых скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , момента ведомого шкива  $M_2$ , отношений  $i_R, i_M$  и  $i_\omega$ . При  $M_{1s}/M^* = 0,25$  отношения амплитуд к средним величинам  $i_\omega$  и  $i_M$  равны 0,079 и 0,016. Силы упругости пружин при отсутствии гидравлического управления прижатием конусов шкивов к цепи вариатора не обеспечивают постоянное передаточное отношение вариатора при изменении крутящих моментов ведущего или ведомого шкивов.

Моделирование показало, что цепь вариатора является малоинерционным элементом трансмиссии и за доли секунды меняет положение при изменении сил  $N_1$  и  $N_2$ , моментов  $M_1$  и  $M_2$ . Моделирование переходных процессов целесообразно проводить не отдельно вариатора, а всей трансмиссии с учетом инерционных характеристик ДВС, кузова и колес.

## Заключение

С использованием программного комплекса «универсальный механизм» разработана компьютерная динамическая модель для определения характеристик работы цепного вариатора бесступенчатой КП при аварийном отключении системы гидравлического управления.

При близких значениях сил  $N_1 \approx N_2$  или  $N_1 > N_2$  передаточное отношение вариатора не достигает максимальной величины. Чтобы шкивы вариатора заняли положение максимального передаточного отношения винтовая пружина ведомого шкива должна создавать большую силу прижатия конусов к цепи, чем тарельчатая пружина ведущего шкива.

При разгоне автомобиля и плавном увеличении крутящего момента ведущего шкива  $M_1$  отношение угловых скоростей  $i_\omega$  также плавно возрастает. Из-за скольжения цепи на шкивах значения отношений  $i_R, i_M$  и  $i_\omega$  в результатах моделирования не равны. Величина  $i_R$  занимает промежуточное значение между  $i_M$  и  $i_\omega$ . Отсутствие гидравлического управления силами прижатия конусов шкивов к цепи вариатора не обеспечивает постоянное передаточное отношение вариатора при изменении крутящих моментов ведущего или ведомого шкивов.

Средние величины и СКО скорости скольжения цепи на шкивах увеличиваются при увеличении момента  $M^*$ . Ведущий шкив обгоняет цепь, а ведомый шкив отстает от цепи. Из-за большой жесткости цепи, скольжение происходит на всей дуге охвата, дуги сцепления цепи со шкивами отсутствуют.

Линии контакта осей цепи с поверхностью шкива не являются дугами окружности. Причиной изменения расстояний  $R_1$  и  $R_2$  является упругая деформация контактирующих тел и изменение силы растяжения цепи в зоне контакта. В середине линии контакта ТЦ с ведущим шкивом расстояния  $R_1$  уменьшаются. Расстояние  $R_2$  во время контакта ТЦ с ведомым шкивом уменьшается с увеличением силы растяжения цепи. Характер изменения расстояний  $R_1$  и  $R_2$  сохраняется на протяжении всего времени моделирования.

Разница максимального и минимального значений силы растяжения цепи возрастает при увеличении момента ведущего шкива  $M_1$ . В рассмотренных примерах цепь остается растянутой на обеих ветвях.

Цепь вариатора является малоинерционным элементом трансмиссии и за доли секунды меняет положение при изменении нагрузки. Моделировать переходные процессы целесообразно не отдельно вариатора, а всей трансмиссии с учетом инерционных характеристик ДВС, кузова и колес.

Компьютерная модель и установленные закономерности работы цепного вариатора можно использовать при проектировании бесступенчатых КП автомобилей.

#### Список источников:

1. Dunham W., Seok J., Chen W., Dai E., Kolmanovsky I., Girard A. Control of gear ratio and slip in continuously variable transmissions: a model predictive control approach. 2017. SAE World Congress Technical Papers.
2. Wu G., Lu Y., Xu X. Optimization of CVT efficiency based on clamping force control. 2018. IFAC Conference on engine and powertrain control, simulation and modeling. 2018 IFAC-Papers on Line 51(31):898-903.
3. S. van der Meulen, B. der Jager, F. Veldpaus, and M. Steinbuch Combining extremum seeking control and tracking control for high performance CVT operation. 2010. Proc. IEEE Conf. on decision and control.
4. Андреев А.В. Передача трением. М.: Машиностроение, 1978. – 176 с.
5. Реутов А.А. Автоколебания ленты на приводном барабане конвейера. Горный информационно-аналитический бюл. М.: Изд-во Московского государственного горного ун-та, 2013. – № 1. – С. 189-191.
6. Реутов А.А. Моделирование приводов ленточных конвейеров. Брянск: Брянский государственный технический ун-т, 2011. – С. 131-134.
7. Carbone G., Mangialardi L., Bonsen B., Tursi C., Veenhuizen P.A. CVT dynamics: theory and experiments. Mechanism and Machine Theory. 2007. vol. 42, no. 4, pp. 409-428.
8. Bonsen B., Klaassen T.W.G.L., Pulles R.J., Simons S.W.H., Steinbuch M., Veenhuizen P.A. Performance optimization of the push-belt CVT by variator slip control. International Journal of Vehicle Design. 2005. vol. 39, no. 3, pp. 232-256.
9. Tenberge P. Efficiency of chain-CVTs at constant and variable ratio – a new mathematical model for a very fast calculation of chain forces, clamping forces, clamping ratio, slip, and efficiency. SAE Technical Paper. 2004-40-0035 (2004), pp. 35-48.
10. Sattler H. Efficiency of metal chain and V-belt CVT. Proceedings of the International Congress on Continuously Variable Power Transmission CVT'99. 1999. Eindhoven. pp. 99-104.
11. Carbone G., Mangialardi L., and Mantriota G. The influence of pulley deformations on the shifting mechanism of metal belt CVT. ASME January 2005. Journal of Mechanical Design 127. pp. 103-113.
12. Micklem J. D., Longmore D. K., and Burrows C. R. Belt torque losses in a steel V-belt continuously variable transmission. Proc. Instn Mech. Engrs, Part D: J. Automobile Engineering, 1994. 208(13). pp. 91-97.
13. Micklem J. D., Longmore D. K., and Burrows C. R. Modelling of the steel pushing V-belt continuously variable transmission, Proc. Instn Mech. Engrs. Part C: J. Mechanical Engineering Science. 1994. 208(13). pp. 13-27.
14. Tsutsumi K., Miura Y., and Kageyama Y. New hybrid genetic algorithm for pitch sequence optimization of CVT variator chain. SAE Technical Paper. 2017-01-1120 (2017).
15. Nakazawa T., Hattori H., Tarutani I., Yasuhara S., and Inoue T. Static analysis of exciting force in chain continuously variable transmissions (CVT) with a geometric model. Transactions of the JSME. 2018. vol.84, no. 862.

#### References:

1. Dunham W, Seok J, Chen W., Dai E, et al. Control of Gear Ratio and Slip in Continuously Variable Transmissions: a Model Predictive Control Approach. SAE World Congress Technical Papers. 2017.
2. Wu G, Lu Y, Xu X. Optimization of CVT Efficiency Based on Clamping Force Control. In: Proceedings of 5th IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling; 2018 Sep 20-22; Changchun, China: 2018; vol. 51 no.31. p. 898-903.
3. van der Meulen S, de Jager B, Veldpaus F, and Steinbuch M. Combining Extremum Seeking Control and Tracking Control for High Performance CVT Operation. In: Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control; 2010.
4. Andreev A.V. Friction Drive. Moscow: Mashinostroenie; 1978.
5. Reutov A.A. Self-Oscillations of Belt on the Driving Pulley of a Conveyor. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2013;1:189-191.
6. Reutov A.A. Modelling of Belt Conveyor Drives. Bryansk: Bryansk State Technical University; 2011. p. 131-134.
7. Carbone G, Mangialardi L, Bonsen B, et al. CVT Dynamics: Theory And Experiments. Mechanism and Machine Theory. 2007;42(4):409-428.
8. Bonsen B, Klaassen TWGL, Pulles RJ, et al. Performance Optimization of the Push-Belt CVT by Variator Slip Control. International Journal of Vehicle Design. 2005;39(3):232-256.
9. Tenberge P. Efficiency of Chain-CVTs at Constant and Variable Ratio – a New Mathematical Model for a Very Fast Calculation of Chain Forces, Clamping Forces, Clamping Ratio, Slip, and Efficiency. SAE Technical Paper. 2004;40:35-48.
10. Sattler H. Efficiency of Metal Chain and V-belt CVT. In: Proceedings of the International Congress on Continuously Variable Power Transmission CVT'99. Eindhoven: 1999. p. 99-104.
11. Carbone G., Mangialardi L., Mantriota G. The Influence of Pulley Deformations on the Shifting Mechanism of Metal Belt CVT. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME. Jan 2005;127:103-113.
12. Micklem J.D., Longmore D.K., Burrows C.R. Belt Torque Losses in a Steel V-belt Continuously Variable Transmission. Proc. Instn Mech. Engrs: J. Automobile Engineering, 1994;208;D-(13):91-97.
13. Micklem J.D., Longmore D.K., Burrows C.R. Modelling of the Steel Pushing V-belt Continuously Variable Transmission, Proc. Instn Mech. Engrs: J. Mechanical Engineering Science. 1994;208;C-(13):13-27.
14. Tsutsumi K., Miura Y., Kageyama Y. New Hybrid Genetic Algorithm for Pitch Sequence Optimization of CVT Variator Chain. SAE Technical Paper. 2017;01:1120.
15. Nakazawa T, Hattori H, Tarutani I, et al. Static Analysis of Exciting Force in Chain Continuously Variable Transmissions (CVT) with a Geometric Model. Transactions of the JSME. 2018;84:862.

16. Srivastava N., Haque I. Clearance and friction induced dynamics of chain CVT drives. *Multibody System Dynamics*. 2008. vol. 19(3) pp. 255-280.

17. Pfeiffer F. Spatial motion of CVT-chains. January 2005. *Solid Mechanics and its Applications*. vol. 122. pp. 81-95.

18. Bonsen B., Klaassen T., Pulles R.J., Simons S. Performance optimisation of the push-belt CVT by variator slip control. *International Journal of Vehicle Design*. 2005. vol. 39(3).

19. Bonsen B., Klaassen T., K.G.O. van de Meerakker, Steinbuch M., Veenhuizen P.A. Analysis of slip in a continuously variable transmission. *Proceedings of IMECE'03*, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress, Paper No. IMECE2003-41360. vol. 72, no. 2, November 15–21, 2003. pp. 995-1000.

20. Nishanth A., Nanthakumar P., Lakshmikanthan C. Model based simulation of a CVT variator to analyse the slip characteristics of the CVT belt. *Journal of Physics: Conference Series* 2021. 1854 012015.

21. Бесступенчатая автоматическая коробка передач multitronic 01J. Устройство и принцип действия. Программа самообучения 228. URL: <http://volkswagen.msk.ru> (дата обращения: 23.02.2025).

22. Reutov A.A. Моделирование пуска ДВС автомобиля с бесступенчатой коробкой передач // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. – № 3 (16). – С.41-52.

23. Pennings B., Mark van Drogen, Brandsma A., Erik van Ginkel, and Lemmens M. Van Doorne CVT Fluid Test: A Test Method on Belt-Pulley Level to Select Fluids for Push Belt CVT Applications. *SAE Technical Papers*. Conference: SAE Powertrain and Fluid Systems Conference. October 2003. Pittsburgh.

24. Maaike van der Laan, Mark van Drogen, and Brandsma A. Improving push belt CVT efficiency by control strategies based on new variator wear insight. 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/242076667>.

25. Universal Mechanism. Mechanical System as an Object for Modeling. User's manual. 2020. URL: [http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/02\\_um\\_technical\\_manual.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/90/eng/02_um_technical_manual.pdf) (дата обращения: 23.02.2025).

26. Reutov A. Modeling of the flexible belt motion on the drive pulley of woodworking equipment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 392. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" 23–24 October 2019, Voronezh, Russia.

16. Srivastava N., Haque I. Clearance and Friction Induced Dynamics of Chain CVT Drives. *Multibody System Dynamics*. 2008;19(3):255-280.

17. Pfeiffer F. Spatial Motion of CVT-Chains. *Solid Mechanics and its Applications*. Jan 2005;122:81-95.

18. Bonsen B., Klaassen T., Pulles RJ, et al. Performance Optimisation of the Push-Belt CVT by Variator Slip Control. *International Journal of Vehicle Design*. 2005;39(3).

19. Bonsen B., Klaassen T., van de Meerakker KGO, et al. Analysis of Slip in a Continuously Variable Transmission. In: *Proceedings of IMECE'03*, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress; 2003 Nov 15-21; Washington: 2003; vol. 72, no. 2. p. 995-1000. Paper No. IMECE2003-41360.

20. Nishanth A., Nanthakumar P., Lakshmikanthan C. Model Based Simulation of a CVT Variator to Analyse the Slip Characteristics of the CVT Belt. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1854:012015.

21. Continuously Variable Automatic Transmission Multitronic 01J. Device and Operating Principle. Training Program 228 [Internet] [cited 2025 Feb 23]. Available from: <http://volkswagen.msk.ru>.

22. Reutov A.A. Simulation of Starting an Internal Combustion Engine of a Car with a Continuously Variable Transmission. *Automation and Modelling in Design and Management*. 2024;3(16):41-52.

23. Pennings B., van Drogen M., Brandsma A., et al. Van Doorne's CVT Fluid Test: A Test Method on Belt-Pulley Level to Select Fluids for Push Belt CVT Applications. In: *Proceedings of the 2003 Powertrain and Fluid Systems Conference*; 2003 Oct 27-30; Pittsburgh, US: SAE International: 2003. p. 1-16. (SAE Technical Paper).

24. van der Laan M., van Drogen M., Brandsma A. Improving Push Belt CVT Efficiency by Control Strategies Based on New Variator Wear Insight [Internet]. 2004. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/242076667>

25. Universal Mechanism. Mechanical System as an Object for Modelling. [Internet]. 2020 [cited 2025 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)

26. Reutov AA. Modelling of the Flexible Belt Motion on the Drive Pulley of Woodworking Equipment. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions*; 2019 Oct 23-24; Voronezh, Russia: Institute of Physics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; vol.392, p. 012056.

## Информация об авторах:

### Реутов Александр Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, Scopus ID: 36704986300, 55930922900, ORCID ID: 0000-0002-1703-6654, ORCID ID: 0000-0003-1117-8536

**Статья поступила в редакцию 13.03.2025; одобрена после рецензирования 28.03.2025; принята к публикации 08.04.2025.**

**The article was submitted 13.03.2025; approved after reviewing 28.03.2025; accepted for publication 08.04.2025.**

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

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

## Information about the authors:

**Aleksander Alekseevich Reutov** Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Production and Service in Transport Machine Building of Bryansk State Technical University, Scopus ID: 36704986300, 55930922900, ORCID ID: 0000-0002-1703-6654, ORCID ID 0000-0003-1117-8536

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.5:519.8

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-55-64

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Виктор Александрович Широченко<sup>1✉</sup>, Никита Петрович Скрылев<sup>2</sup>,  
Вадим Александрович Недюхин<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

<sup>1</sup> shirsvet@tut.by, <http://orcid.org/0009-0002-0198-5262>

<sup>2</sup> mniccita@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0004-4698-0558>

<sup>3</sup> firevadick@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0003-0221-6139>

**Аннотация.** Цель исследования: обоснование структуры и параметров математической модели, пред назначенной для решения задачи оптимизации загрузки оборудования промышленного предприятия с многономернократным серийным производством. Задача: разработка математической модели и реализующей ее программной системы для проведения исследований ее эффективности при решении задачи повышения эффективности промышленного производства. Методы исследования: математическое моделирование на основе методов линейного программирования. Новизна работы: рассмотрены вопросы обоснования параметров математической модели для оптимизации загрузки оборудования при высокой размерности задачи. Результаты исследования: разработаны математическая модель и программное обеспечение, позволяющее повысить эффективность функционирования промышленного предприятия. Выводы: результаты проведенных исследований будут полезными разработчикам программных систем, используемых для управления производством на промышленных предприятиях.

**Ключевые слова:** производственный процесс, производственная мощность, методы линейного моделирования, многономернократное производство, управление производственными ресурсами, оптимизация загрузки оборудования

**Для цитирования:** Широченко В.А., Скрылев Н.П., Недюхин В.А. Особенности оптимизации промышленного производства на основе математического программирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 55-64. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-55-64.

Original article

Open Access Article

## FEATURES OF INDUSTRIAL PRODUCTION OPTIMIZATION BASED ON MATHEMATICAL PROGRAMMING

Victor A. Shirochenko<sup>1✉</sup>, Nikita P. Skrylev<sup>2</sup>, Vadim A. Nedyukhin<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

<sup>1</sup> shirsvet@tut.by, <http://orcid.org/0009-0002-0198-5262>

<sup>2</sup> mniccita@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0004-4698-0558>

<sup>3</sup> firevadick@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0003-0221-6139>

**Abstract.** The aim of the study is to substantiate the structure and parameters of a mathematical model intended for solving the task of optimizing loading the equipment at an industrial enterprise engaged in multivariety series production. The objective is to develop a mathematical model and a software implementation system to conduct studies assessing its effectiveness in addressing the challenge of enhancing industrial production efficiency. The paper uses a method of mathematical modelling based on linear programming methods. The novelty of the study addresses questions regarding the validation of parameters for a mathematical model optimized for equipment loading in tasks with high-dimensional complexity. The findings include developing a mathematical model and associated software, capable of boosting the operational efficiency of industrial enterprises. The conclusions are the results of this study will prove useful for developers of software systems employed in production management at industrial enterprises.

**Keywords:** production process, production capacity, linear modelling methods, multi-product production, production resource management, equipment loading optimization

---

## Введение

Повышение эффективности производственных процессов является ключом к успеху для любой компании и является важным фактором для развития экономики и повышения уровня жизни. Одним из важнейших инструментов, позволяющих это обеспечить, являются информационные технологии, основанные на математическом моделировании производственных процессов. Аналитические инструменты позволяют создавать и использовать системы планирования и управления ресурсами, которые могут оптимизировать процессы и значительно повысить эффективность производства.

Первым шагом на пути повышения производительности производственных процессов является оптимизация загрузки оборудования, что позволяет в полной мере использовать его производственные мощности. С точки зрения математики такая задача может быть поставлена как достаточно простая задача линейного программирования, которая описана достаточно подробно в различных источниках [1, 2].

Однако примеры, рассмотренные в литературе, имеют небольшую размерность и простую структуру, а размерность реальных производственных систем, как правило, достигает нескольких сотен технологических операций и сотен единиц оборудования. При математической постановке задачи в этих условиях, будут определены сотни управляемых параметров и сотни ограничений. Ввиду большой размерности промышленных производств и специфики использования оборудования такая задача имеет множество особенностей, которые нуждаются в подробном рассмотрении.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Конструкция сложных технических изделий имеет иерархическую структуру с множеством подсистем, каждая из которых состоит из узлов или сборочных единиц, собираемых из отдельных деталей. В этом случае изделие состоит из нескольких сотен деталей. В свою очередь для изготовления каждой детали существует свой технологический процесс, состоящий из нескольких технологических операций, выполняемых последовательно на соответствующем оборудовании. Сборка деталей в узлы также осуществляется по некоторой технологии на специальных рабочих местах с соответствующим оборудованием.

С целью упрощения описания упомянутой выше математической модели производственного процесса рассмотрим постановку задачи на достаточно простом изделии, структура которого представлена на рис. 1. Приведенное изделие состоит только из двух сборочных единиц, каждая из которых имеет по две детали. Несмотря на такой простой пример с его помощью можно рассмотреть множество нюансов постановки и решения задачи оптимизации производственного процесса любого технического изделия.



Рис. 1. Структура изделия  
Fig. 1. Product structure

На рис. 2 приведен пример схемы технологического процесса производства этого изделия. На схеме видно, что каждая из деталей имеет свой технологический процесс, состоящий из одной или двух технологических операций. Каждая операция выполняется на соответствующем оборудовании и имеет свою длительность.

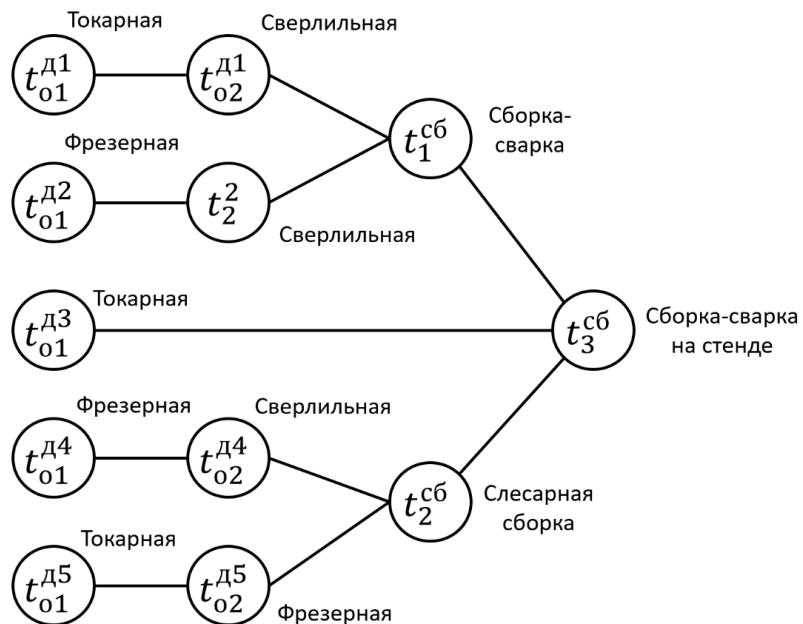


Рис. 2. Схема производственного процесса изготовления изделия  
Fig. 2. The scheme of the manufacturing process of the product

При массовом производстве станочный парк предприятия формируют под изготавливаемые изделия таким образом, что за каждой единицей оборудования закрепляется только одна операция, а количество оборудования подбирается с целью максимальной его загрузки. Эффективность производства в этом случае обеспечивается при его проектировании и поддерживается организационными мероприятиями, проводимыми на предприятии.

В случае серийного или крупносерийного многопродуктового производства в разные временные периоды изменяется номенклатура его продукции и объемы ее выпуска. В этом случае загрузка оборудования все время меняется, а следовательно, остро встает вопрос об ее оптимизации для наиболее эффективного использования имеющихся производственных мощностей [3].

В связи с этим рассмотрим решение задачи закрепления за имеющимся оборудованием выполнения необходимых технологических операций на примере изделия, представленного в вышеуказанном примере. Предположим, что предприятие располагает необходимым оборудованием для выполнения только требуемых технологических операций и задача оптимизации ставится в рамках имеющегося станочного парка.

В случае реального производства станочный парк будет иметь значительно большую номенклатуру. Задача оптимизации загрузки большого парка оборудования будет иметь многократно большую размерность, но в плане ее постановки различий не будет.

Далее будем считать, что однотипные операции могут выполняться на любом из станков данного типа и даже выполняться на нескольких из них одновременно. Например, некоторая токарная операция при наличии нескольких токарных станков может выполняться на любом из них или частично на одном и частично на другом. Поэтому при описании технологических цепочек изготовления различных деталей будем расписывать альтернативные варианты закрепления операций за оборудованием.

Возможный вариант описания указанных технологических операций, представленных на рис. 2 приведен в табл. 1. В каждой строке таблицы указан номер операции, название операции, конкретный станок, на котором она может быть выполнена и время ее выполнения.

Номер операций показывает их последовательность в процессе производства и как принято в технологических документах возрастает с шагом 5. Это сделано для того чтобы при внесении изменений в технологические процессы при добавлении операций не изменять полностью всю документацию, а только ее дополнять. Например, при необходимости добавить операцию в самое начало процесса ее номер может быть 003, а если надо добавить после первой операции, то номер будет 007.

Таблица 1

Описание параметров производственных операций

Table 1

*Description of production operation parameters*

Номер операции	Операция	Оборудование	Количество оборудования	Время операции, мин
Деталь 1				
005	Токарная	Токарный станок 1	1	5
005	Токарная	Токарный станок 2	1	5
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	3
010	Сверлильная	Сверлильный станок 2	1	3
Деталь 2				
005	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	6
005	Фрезерная	Фрезерный станок 2	1	6
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	2
010	Сверлильная	Сверлильный станок 2	1	2
Деталь 3				
005	Токарная	Токарный станок 1	1	5
005	Токарная	Токарный станок 2	1	5
Деталь 4				
005	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	7
005	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	7
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	4
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	4
Деталь 5				
005	Токарная	Токарный станок 1	1	4
005	Токарная	Токарный станок 2	1	4
010	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	6
010	Фрезерная	Фрезерный станок 2	1	6
Сборочная единица 1				
005	Сборка-сварка	Сварочный полуавтомат	1	7
Сборочная единица 2				
005	Слесарная сборка	Слесарное место	1	10
Изделие: сборочная единица 3				
005	Сборка-сварка	Кантователь	1	15
		Сварочный полуавтомат	1	

Повторяющийся в таблице номер технологической операции показывает возможные альтернативы закрепления операций за различными единицами оборудования. Длительность выполнения одной и той же операции на различных станках, в связи с различием их параметров, может отличаться, но для рассматриваемых в данной работе вопросов это не имеет существенного значения.

При решении задачи оптимизации загрузки оборудования могут рассматриваться следующие подходы. В первом подходе может рассматриваться задача максимизации загрузки оборудования при необходимости произвести заданный объем продукции за определенный период времени. При этом мы можем столкнуться с проблемой нехватки фонда рабочего времени оборудования для производства.

Во втором подходе может ставиться задача определения максимально возможного объема производства продукции в заданный период. Объем продукции может определяться либо в натуральных единицах, либо в стоимостном выражении.

В третьем подходе при невозможности произвести требуемый объем продукции в заданный период собственными силами необходимо определить минимальный объем производства деталей для передачи другим производителям, например, в рамках кооперации.

Рассмотрим, как ставится задача оптимизации и все ее особенности в рамках первого подхода на производстве изделий, конструкция и технология которого описаны ранее. Зададимся объемом производства в 30 шт., периодом в одну смену, продолжительностью в 480 мин. и штучным временем выполнения соответствующих операций, приведенным в табл. 1.

Первым шагом к решению задачи необходимо оценить возможность получения положительного результата. Для этого представим исходные данные в таблице как это показано на рис. 3.

Элемент	Кол-во в сборке	Кол-во на изделие	Операция	Исходные технологические параметры тщущное								
				Фрезерный		Сверлильный		Токарный		Сварка		Слесарный
				Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1
C63	1	30	C63									15
C62	1	30	C62									10
C61	2	60	C61								7	
Дет 1	2	120	Оп1д1						5	5		
		120	Оп2д1			3	3					
Дет 2	1	60	Оп1д2	6	6							
		60	Оп2д2			2	2					
Дет 3	2	60	Оп1д3						5	5		
Дет 4	1	30	Оп1д4	7	7							
		30	Оп2д4			4	4					
Дет 5	1	30	Оп1д5						4	4		
		30	Оп2д5	6	6							
						750	600	1020	420	300	450	

Рис. 3. Матрица исходных данных  
Fig. 3. The matrix of the initial data

На рисунке прямоугольная область, выделенная жирной линией, представляет собой матрицу  $t_{шт}$  – длительность операций, выполняемых на соответствующем оборудовании. Каждая строка матрицы соответствует некоторой технологической операции, а столбец – используемому оборудованию. Слева от матрицы представлены данные по структуре изделия и количеству выполнения соответствующих операций. Используя данную таблицу, путем простейших математических операций, можно легко вычислить величину необходимого фонда времени соответствующего оборудования, необходимого для изготовления изделия в заданном объеме. Вычисленная величина необходимого фонда времени представлена под матрицей в соответствующих столбцах по видам оборудования.

Так как рассматривается одна смена в 480 мин., а фрезерных и сверлильных станков по два, то их фондов времени вполне достаточно для производства. А вот для токарной операции фонда времени не хватает, поэтому получить решение поставленной задачи линейного программирования с такими исходными данными невозможно. Для обеспечения возможности решения задачи представим, что один из токарных станков работает сверхурочно половину второй смены.

В данной постановке задачи управляемыми параметрами являются количества выполняемых операций, закрепленных за соответствующим оборудованием. В качестве ограничений приняты фонды времени по оборудованию и количество операций, которые должны быть выполнены в соответствии с планом производства (рис. 4). Кроме этого, на управляемые параметры должны быть наложены условия целочисленности.

В качестве целевой функции можно взять разницу между суммарным значением существующего фонда времени по оборудованию и суммарным значением времени занятости оборудования в производственном процессе. Данную величину необходимо максимизировать. Таким образом мы получаем аддитивную целевую функцию.

	Фрезерный	Сверлильный	Токарный	Сварка	Слесарный	Стенд			
	Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1
C63									450
C62								300	
C61							420		
Оп1д1					480	120			
Оп2д1			360	0					
Оп1д2	360	0							
Оп2д2			120	0					
Оп1д3					0	300			
Оп1д4	0	210							
Оп2д4			0	120					
Оп1д5					0	120			
Оп2д5	0	180							
Затраты времени по оборудованию	360	390	480	120	480	540	420	300	450
	=	=	=	=	=	=	=	=	=
Фонд времени по оборудованию	480	480	480	480	480	720	480	480	480
Значение целевой функции									= 1020

Рис. 4. Трудоемкость операций по оборудованию с учетом их количества  
*Fig. 4. The complexity of equipment operations, taking into account their number*

Математически такая постановка задачи может быть записана следующим образом.

$$\sum_{j=1}^m t_{ij} x_{ij} \leq \Phi_j \quad \text{при } i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = N_{изд} n_k \quad \text{при } i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$x_{ij} - \text{целые}; \quad (3)$$

$$F = \sum_{j=1}^m \Phi_j - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, \quad (4)$$

или

$$F(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $n$  – количество технологических операций;  $m$  – количество единиц оборудования;  $t_{ij}$  – длительность  $i$ -ой операции, выполняемой на  $j$ -м оборудовании;  $\Phi_j$  – фонд времени  $j$ -го оборудования;  $N_{изд}$  – количество произведенных изделий;  $x_{ij}$  – количество выполняемых  $i$ -х операций, закрепленных за  $j$ -м оборудованием;  $F(x_{ij})$  – аддитивная целевая функция.

Главным недостатком применения аддитивной целевой функции является бесконтрольное влияние каждого из слагаемых на целевую функцию, т.е. улучшение значения целевой функции может происходить при ухудшении одного или нескольких ее слагаемых [4]. В связи с этим при возможности или необходимости закрепить одну операцию за несколькими станками мы никак не можем в ходе поиска оптимального решения управлять соотношением этой загрузки. Может получиться так, что один из альтернативных станков выберет свой фонд времени полностью, тогда как второй будет загружен только частично.

## Результаты

В качестве решения мы получим матрицу значений управляемых параметров, представленных на рис. 5. Полученная матрица решений является весьма разреженной и чем больше размерность производственного процесса, тем больше ее разреженность. Такой вид матрицы решений затрудняет построение вычислительно процесса, поэтому все управляемые параметры можно свести в отдельный вектор, каждый элемент которого будет соответствовать некоторому элементу матрицы.

Из полученного решения видно, что все операции в полном объеме закреплены за единственным оборудованием, и только токарная операция при изготовлении детали 1 выполняется частично на первом токарном станке и частично на втором.

		Количество выполняемых операций, закрепленных за оборудованием (управляемые параметры)														
		Фрезерный	Сверлильный	Токарный	Сварка	Слесарный	Стенд	Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1
		C63														30
		C62														30
	Дет 1	C61														60
		Оп1д1										96	24			
	Дет 2	Оп2д1			120	0										
		Оп1д2	60	0												
	Дет 3	Оп2д2			60	0										
		Оп1д3										0	60			
	Дет 4	Оп1д4	0	30												
		Оп2д4			0	30										
	Дет 5	Оп1д5										0	30			
		Оп2д5	0	30												

Рис. 5. Решение задачи оптимизации  
Fig. 5. Solving the optimization problem

Соответствующая этому решению загрузка оборудования видна на рис. 4 в табличном виде и на рис. 6 в графическом виде с размерностью, измеряемой временем. Если поделить эти значения на длительность периода, т.е. смены, то получим величину загрузки оборудования в относительном значении или в процентах. Такие значения при анализе воспринимаются значительно понятней. Так средняя загрузка оборудование по всему производству равна 78 %, что является довольно высокой загрузкой.

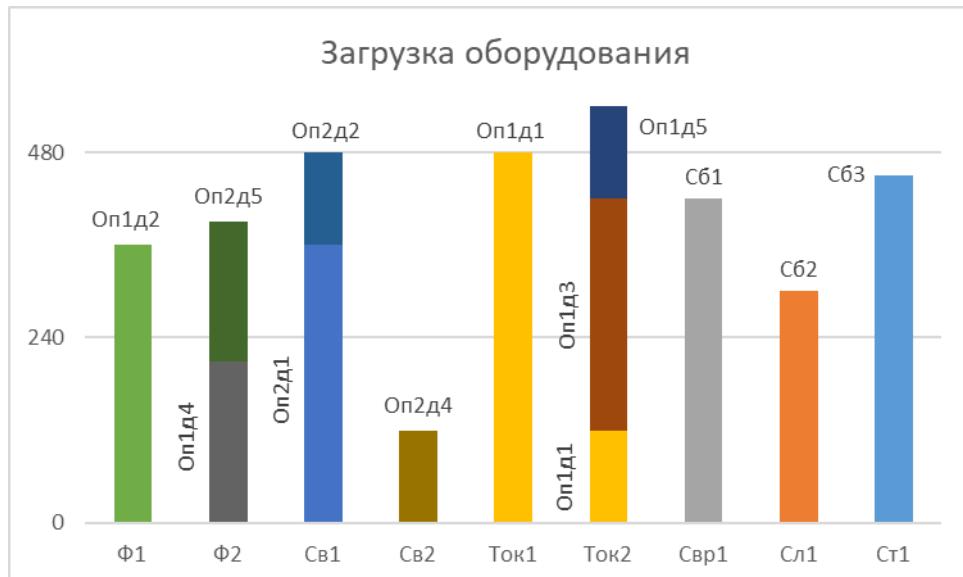


Рис. 6. Графическая иллюстрация загрузки оборудования  
Fig. 6. Graphical illustration of equipment loading

Если будет использована целевая функция (5), в которой минимизируется суммарное время на производство заданного объема изделий, то существующие фонды времени можно не учитывать в модели. Однако в этом случае можно ожидать, что полученный «минимальный» период будет определен исходя из полной загрузки одного из альтернативных станков. Такой выбор результата скорее будет соответствовать максимальному периоду, в который можно уместить производственный процесс.

На рис. 7 представлены результаты решения задачи без учета ограничений по фондам времени. Из них видно, что все фрезерные операции закреплены за одним фрезерным станком несмотря на наличие второго станка. Тоже самое произошло и со сверлильными и токарными станками. В результате «минимальный» период стал больше, чем в примере на рис. 4.

Кол. Изд.	25	Кол. эл	Фрезерный Сверлильный Токарный Сварка Слесарный Стенд								
			Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1
C63	1	25	C63								375
C62	1	25	C62								250
C61	2	50	C61								350
Дет 1	2	100	Оп1д1				0	500			
		100	Оп2д1		0	300					
Дет 2	1	50	Оп1д2	0	300						
		50	Оп2д2		100	0					
Дет 3	2	50	Оп1д3				0	250			
Дет 4	1	25	Оп1д4	0	175						
		25	Оп2д4		0	100					
Дет 5	1	25	Оп1д5				0	100			
		25	Оп2д5	0	150						
Затраты времени по оборудованию			0	625	100	400	0	850	350	250	375
											$\Sigma$ 2950

Рис. 7. Трудоемкость операций по оборудованию с учетом их количества без учета ограничений по фонду времени  
*Fig. 7. The complexity of equipment operations, taking into account their number, without taking into account time constraints*

Для того чтобы действительно получить значение минимального периода целесообразно использовать такую целевую функцию, которая позволила бы равномерно распределить загрузку оборудования. Для этого можно свести разность между максимальным и минимальным временем загрузки оборудования к минимуму. В этом случае целевая функция может быть записана в виде:

$$F(x_{ij}) = \left( \max_{1 \leq j \leq m} (\sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij}) - \min_{1 \leq j \leq m} (\sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij}) \right)^2, \quad (6)$$

и задача становится нелинейной.

Результаты решения задачи с такой целевой функцией представлены на рис. 8. Стоит отметить, что на решение даже такой маломерной задачи (в ней всего только два десятка управляемых параметров и примерно столько же ограничений) потребовалось несколько секунд, что значительно больше чем время решения линейной задачи.

Из рис. 8 видно, что все станки загружены примерно одинаково. Это позволяет максимально уменьшить затраты времени на узком месте. Узким местом по-прежнему являются токарные станки, но значение времени операций на одно изделие равно 425 вместо 850 как это было показано на рис. 7. Однако при этом на токарном станке Ток1 три переналадки, а на станке Ток2 – две. На выполнение этих переналадок будет затрачено дополнительное время, которое в данном расчете никак не учитывается. Существуют переналадки и на другом оборудовании, что может оказать значительно меньшее влияние на длительность всего производственного процесса.

## Выводы по исследованию

Из результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получить удовлетворительное решение, обеспечивающее получение максимальной загрузки оборудования и, следовательно, минимального периода производства при заданном его объеме, с помощью методов линейного программирования – невозможно.
2. Применение нелинейных методов дает положительный результат, однако менее предпочтительно, т.к. для данной задачи в полной размерности требует существенных затрат времени.

Кол. Изд.	25	Кол эл	Фрезерный Сверлильный Токарный Сварка Слесарный Стенд									
			Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1	
C63	1	25	C63								375	
C62	1	25	C62								250	
C61	2	50	C61								350	
Дет 1	2	100	Оп1д1				180	320				
		100	Оп2д1		51	249						
Дет 2	1	50	Оп1д2	138	162							
		50	Оп2д2		98	2						
Дет 3	2	50	Оп1д3				145	105				
Дет 4	1	25	Оп1д4	0	175							
		25	Оп2д4		100	0						
Дет 5	1	25	Оп1д5				100	0				
		25	Оп2д5	126	24							
Затраты времени по оборудованию			264	361	249	251	425	425	350	250	375	
			<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	
Фонд времени по оборудованию			480	480	480	480	480	720	480	480	480	
Значение целевой функции			Max= 425	Min= 249							(Max-Min)^2 = 30976	

Рис. 8. Использование квадратичной целевой функции

Fig. 8. Using a quadratic objective function

3. Минимальное значение длительности производственного процесса однозначно определяется степенью равномерности загрузки той части оборудования, которое является узким местом для производства.

4. Для надежного и быстрого решения задачи следует разбить ее на ряд подзадач, каждая из которых будет описывать однотипное оборудование, на котором возможно альтернативное выполнение операций.

5. Подзадачу с тем оборудованием, которое будет максимально загружено, а значит являться узким местом производства целесообразно решать на основе квадратичной целевой функции.

6. Остальные подзадачи должны обеспечить минимум переналадок соответствующего оборудования и поэтому их можно решать, как задачи линейного программирования с ограничениями по фонду времени, равными длительности операций в так называемом узком месте. Такой подход позволит сократить время на максимально загруженных операциях и минимизировать количество переналадок на другом оборудовании.

7. В ситуации возможного решения постановка такой задачи имеет смысл только в том случае, если альтернативное оборудование имеет различную производительность. В такой ситуации, если ищется минимум коэффициента загрузки (т.е. состояние, когда оборудование будет менее загружено), то в первую очередь будет загружаться более производительное оборудование, а затем менее производительное. Последнее может оказаться менее загруженным. При поиске максимума коэффициента загрузки наоборот: в первую очередь будет загружаться менее производительное оборудование. Таким образом, в первом случае будет максимально загружено более производительное оборудование, а во втором – менее производительное. В ситуации, если альтернативное оборудование имеет равную производительность, то решения задачи на максимум и на минимум дадут абсолютно одинаковый результат коэффициента загрузки.

8. Как при разной производительности альтернативного оборудования, так и при равной будет находиться множество одинаковых результатов, т.е. задача в данной постановке является многоэкстремальной, причем экстремумы равны между собой. Различие между полученными решениями будут только в разном сочетании закрепленных операций за оборудованием. При этом при наличии разнопроизводительного оборудования таких одинаковых решений будет меньше, а при равнопроизводительном оборудовании их будет значительно больше.

9. Поиск всех возможных равноценных решений задачи очень затратен и может потребовать часы работы программы. В связи с этим поиск нецелесообразен. Предпочти-

тельным закреплением операций может быть такое сочетание, при котором будет требоваться меньше переналадок оборудования. Такое требование можно включить в ограничения задачи оптимизации. Все остальные альтернативные решения могут быть абсолютно равнозначными и, в связи с этим можно ограничиться поиском только одного из них.

## Заключение

Проведенные исследования позволили глубоко изучить возможности постановки и решения задачи повышения эффективности производства на основе использования методов оптимизации загрузки оборудования. Полученные результаты позволили выполнить разработку программной системы, в которой реализованы описанные выше положения. Программная система имеет клиент-серверную архитектуру и выполнена на алгоритмическом языке *C#*. Оптимизационные процедуры построены на основе общедоступной библиотеки *Google OR Tools*, которое является программным обеспечением с открытым исходным кодом и предназначено для решения различных задач линейного программирования с ограничениями, в том числе и с условиями целочисленности.

Созданная программная система в настоящий момент успешно проходит этап испытаний, после которого будет передана для использования на промышленное предприятие с многою номенклатурным серийным производством.

### Список источников:

1. Новиков А.И. Исследование операций в экономике: Учебник для бакалавров. – 2-е изд. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2020. – 352 с.
2. Исследование операций и методы оптимизации. Часть 1. Лекционный курс. Составитель А.А. Мицель. ТОМСК: Изд. ТУСУР, 2019 – 167 с.
3. Касперович, С.А., Коновалчик Г.О. Организация производства и управление предприятием: учеб. пособие для студентов технических специальностей. – Минск: БГТУ, 2012. – 344 с.
4. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Минск: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.

### Информация об авторах:

#### Широченко Виктор Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» БРУ.

#### Скрылев Никита Петрович

старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления» БРУ.

#### Недюхин Вадим Александрович

магистрант специальности «Системный анализ, управление и обработка информации» БРУ.

**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 27.01.2025; одобрена после рецензирования 28.03.2025; принята к публикации 19.05.2025.**

**The article was submitted 27.01.2025; approved after reviewing 28.03.2025; accepted for publication 19.05.2025.**

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

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

### References:

1. Novikov A.I. Operations Research in Economics. 2nd ed. Moscow: Dashkov & Co; 2020.
2. Mitshel AA, compiler. Operations Research and Optimization Methods. Lecture Course. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; 2019. Part 1.
3. Kasperovich S.A., Konovalchik G.O. Organization of Production and Enterprise Management. Minsk: Belarusian State Technological University; 2012.
4. Tarasik V.P. Mathematical Modelling of Technical Systems. Minsk: Design PRO; 2004.

### Information about the authors:

**Shirochenko Victor Aleksandrovich** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

#### **Skrylev Nikita Petrovich**

Senior Lecturer at the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

**Nedyukhin Vadim Aleksandrovich** Master's student in System Analysis, Management and Information Processing Specialty of Belarusian-Russian University.

## Управление в организационных системах

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.65

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-65-73

### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Дмитрий Александрович Кривошеев<sup>1✉</sup>, Дарья Викторовна Блинова<sup>2✉</sup>

<sup>1, 2</sup> Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет, г. Уфа, Россия

<sup>1</sup> dakrivosheev@gmail.com

<sup>2</sup> blinova.darya@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена применению цифровых информационных моделей (ЦИМ) в нефтегазовой отрасли России и методам синхронизации данных между геоинформационными системами (ГИС) и ЦИМ. В условиях глобальной цифровизации и ограниченного доступа к зарубежному программному обеспечению (ПО), российские компании нефтегазового сектора активно используют ЦИМ для управления инфраструктурой. Авторы рассматривают важность применения ЦИМ для эффективного управления месторождениями, трубопроводами и перерабатывающими заводами, а также проблемы рассогласования данных между различными системами. Особое внимание уделяется выбору инструментальной базы для реализации ГИС на основе российских и open-source решений. Обсуждаются популярные open-source программы, такие как QGIS, PostgreSQL с PostGIS, GeoServer, OpenLayers и GRASS GIS, которые могут быть использованы для создания корпоративной ГИС. Рассмотрен вопрос обменного формата данных ЦИМ и ГИС, уделяя внимание формату IFC как стандарту для обмена данными в строительной отрасли. Рассматриваются подходы к синхронизации атрибутивной информации между ЦИМ и ГИС, а также представление объектов в ЦИМ и ГИС на примере нефтепровода. Предложен механизм синхронизации данных, который включает внесение изменений в структуру и наполнение баз данных, а также обеспечение внесения уникального идентификатора (UID) для каждого объекта. Это позволит упростить процедуру формирования единого информационного пространства предприятия. В заключении подчёркивается актуальность совместного использования ЦИМ и геопространственных данных в организациях и указываются перспективы развития, включая создание библиотек 3D-объектов и интеграцию с IoT-системами для мониторинга инфраструктуры.

**Ключевые слова:** геопространственные данные, цифровые информационные модели, синхронизация, нефтегазовый сектор, ГИС, BIM, IFC, импортозамещение

**Для цитирования:** Кривошеев Д.А., Блинова Д.В. Формализация процедуры синхронизации геопространственных данных и цифровых информационных моделей // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 65-73. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-65-73.

Original article

Open Access Article

### FORMALIZATION OF GEOSPATIAL DATA AND DIGITAL INFORMATIONAL MODEL SYNCHRONIZATION PROCEDURE

Dmitry A. Krivosheev<sup>1✉</sup>, Darya V. Blinova<sup>2✉</sup>

<sup>1, 2</sup> Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

<sup>1</sup> dakrivosheev@gmail.com

<sup>2</sup> blinova.darya@gmail.com

**Abstract.** The article focuses on applying digital informational models (DIM) in the oil and gas industry of Russia and synchronization methods for data exchange between geographic information systems (GIS) and DIM. Given global digitization trends and limited access to foreign software solutions (SS), Russian oil and gas companies actively employ DIM for infrastructure management. The authors emphasize the importance of implementing DIM for effective control over fields, pipelines, and refining plants while highlighting challenges arising from data inconsistencies among different systems and paying specific attention to selecting tools for implementing GIS based on domestic and open-source solutions. The authors discuss various popular open-source programs such as QGIS, PostgreSQL with PostGIS, GeoServer, OpenLayers, and GRASS GIS as potential candidates for corporate GIS deployment. The paper explores the issue of exchanging data formats between DIM and GIS, focusing on the IFC standard commonly used in construction; examines approaches to synchronizing attribute information between DIM and GIS, including representation examples using an oil pipeline. A proposed mechanism for data synchronization includes modifications to database structures and content updates, ensuring each object receives a unique identifier (UID). This approach simplifies the procedure for forming a unified information space within the company. In conclusion, the relevance of joint usage of DIM and geospatial data in organizations is emphasized, outlining future prospects like building libraries of 3D objects and integrating IoT systems for monitoring infrastructure.

**Keywords:** geospatial data, digital informational models, synchronization, oil and gas sector, GIS, BIM, IFC, import substitution

**For citation:** Krivosheev D.A., Blinova D.V. Formalization of Geospatial Data and Digital Informational Model Synchronization Procedure. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 65-73. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-65-73.

## Введение

Нефтегазовый сектор характеризуется высокой сложностью управления инфраструктурой, включающей месторождения, трубопроводы, перерабатывающие заводы и другие объекты. Для эффективного управления этими активами используются:

- геопространственные данные (координаты, карты, данные дистанционного зондирования);
- цифровые информационные модели (ЦИМ), такие как *BIM* (*Building Information Modeling*) и *CAD*-модели.

Цифровые информационные модели (ЦИМ) становятся неотъемлемой частью современной экономики и промышленности, и их использование в России приобретает особую значимость в условиях глобальной цифровизации и технологической трансформации. Цифровые информационные модели представляют собой виртуальные копии физических объектов, процессов или систем, которые используются для проектирования, строительства, эксплуатации и управления. В России их применение охватывает широкий спектр отраслей, включая строительство, энергетику, транспорт, нефтегазовый сектор и городское хозяйство.

Внедрение технологий информационного моделирования (*BIM*, *Building Information Modeling*) позволяет значительно повысить эффективность проектирования, строительства и эксплуатации объектов. Цифровые информационные модели обеспечивают точное планирование, координацию между участниками проекта и минимизацию ошибок на этапе проектирования. Это особенно важно в условиях России, где климатические и географические особенности часто усложняют строительные процессы. Например, в регионах с суровым климатом или сложным рельефом ЦИМ позволяют заранее проработать все технические решения и избежать дорогостоящих изменений на этапе строительства.

Кроме того, использование ЦИМ способствует снижению затрат и сроков строительства объектов [1]. В России, где инфраструктурные проекты часто сталкиваются с проблемами финансирования и затягивания сроков, это может стать важным фактором повышения эффективности. Например, при строительстве мостов, дорог или объектов энергетики ЦИМ позволяют оптимизировать использование ресурсов и сократить количество отходов.

Нефтегазовый сектор является одной из ключевых отраслей российской экономики, и использование цифровых информационных моделей здесь имеет особое значение. Цифровые информационные модели позволяют создавать виртуальные копии месторождений, нефтеперерабатывающих заводов, трубопроводов и других объектов, что обеспечивает возможность их эффективного управления и мониторинга.

Проблема рассогласования данных между этими системами приводит к ошибкам в проектировании, эксплуатации и обслуживании объектов. В условиях ограниченного доступа к зарубежному ПО, актуальной задачей становится разработка методик синхронизации данных систем на основе российских и *open-source* решений.

## Методология синхронизации данных

*Выбор инструментальной базы для реализации геоинформационной системы.* В условиях ограниченного доступа к зарубежному программному обеспечению, предприятия нефтегазового сектора могут использовать только российские и *open-source* решения для реализации информационной инфраструктуры предприятия.

Каждая крупная компания решает, какие программные продукты в сфере ГИС максимально отвечают её потребностям. При выборе рассматриваются вопросы доступности программного обеспечения, стоимости, информационной базы, наличия технической поддержки, возможности дополнения модулями и масштабирования системы.

В предыдущие годы часто крупные кампании нефтегазовой отрасли использовали зарубежные коробочные решения, такие как *ESRI ArcGIS Server (Enterprise)*, позволяющие развернуть на имеющейся инфраструктуре предприятия полноценную геоинформационную систему с большим количеством возможностей и понятным интерфейсом.

Учитывая геополитические события прошлых лет, многие зарубежные программные продукты стали не доступны для российских пользователей. Более того, российское руководство заблаговременно начало работу над проработкой вопросов по импортозамещению зарубежных программных комплексов.

Безусловно, за короткий промежуток времени крайне сложно создать программное обеспечение аналогичное или опережающее в своём функционале программы с миллионами пользователей по всему миру с десятками лет разработки и модификаций.

Несмотря на это, на российском рынке есть компании, которые предлагают отечественные коммерческие программные продукты в области ГИС для применения в бизнесе. В качестве примера можно привести компанию *NextGIS*, которая является в данный момент одним из основных разработчиков российских геоинформационных комплексов программ.

Но кроме коммерческих программных продуктов существует множество *open source* программ, закрывающих большую часть существующих базовых задач в области ГИС.

Создание корпоративной геоинформационной системы (ГИС) на основе *open-source* решений является актуальным и экономически эффективным подходом, особенно в условиях, когда предприятия стремятся минимизировать затраты на программное обеспечение и обеспечить гибкость в настройке и интеграции систем. *Open-source* программы предоставляют широкие возможности для создания, управления и анализа геопространственных данных, а также позволяют адаптировать систему под конкретные задачи предприятия.

Ключевые *open-source* программы, которые возможно использовать для создания корпоративной ГИС.

1. Настольное ПО *QGIS (Quantum GIS)* является одной из самых популярных *open-source* ГИС в мире. Это мощная и многофункциональная система, которая поддерживает работу с векторными и растровыми данными, а также предоставляет широкие возможности для анализа и визуализации геопространственной информации. *QGIS* поддерживает множество форматов данных, включая *Shapefile*, *GeoJSON*, *KML*, а также позволяет подключаться к базам данных, таким как *PostgreSQL* с расширением *PostGIS*. Для корпоративной ГИС *QGIS* может быть использован как основной инструмент для работы с геоданными. Он поддерживает создание пользовательских плагинов, что позволяет адаптировать систему под специфические задачи предприятия.

2. Система управления базами данных *PostgreSQL* с дополнением *PostGIS* – расширение для работы с геоданными. *PostGIS* является расширением для СУБД *PostgreSQL*, которое

добавляет поддержку геопространственных данных. Это позволяет хранить, запрашивать и анализировать геоданные непосредственно в базе данных. *PostGIS* поддерживает множество геометрических типов данных и функций для пространственного анализа, таких как вычисление расстояний, площадей, пересечений и других операций.

Использование *PostGIS* в корпоративной ГИС позволяет создать централизованное хранилище геоданных, к которому могут подключаться различные приложения и системы. Это обеспечивает высокую производительность и масштабируемость системы, что особенно важно для крупных предприятий с большими объемами данных.

3. *GeoServer* – это *open-source* сервер, который позволяет публиковать геопространственные данные в виде веб-сервисов, таких как *WMS* (*Web Map Service*), *WFS* (*Web Feature Service*) и *WCS* (*Web Coverage Service*). Это делает данные доступными для использования в различных приложениях, включая веб-карты и мобильные приложения.

В корпоративной ГИС *GeoServer* может быть использован для создания централизованного сервиса геоданных, к которому могут подключаться различные подразделения предприятия. Это обеспечивает единый доступ к актуальной информации и упрощает процесс обмена данными между отделами.

4. *OpenLayers* – библиотека для создания веб-карт. Она представляет собой *open-source* *JavaScript* библиотеку для создания интерактивных веб-карт. Она поддерживает работу с различными источниками данных, включая *WMS*, *WFS*, *GeoJSON* и другие форматы. *OpenLayers* позволяет создавать пользовательские интерфейсы для визуализации и анализа геоданных, что делает ее идеальным инструментом для разработки веб-приложений в рамках корпоративной ГИС.

Использование *OpenLayers* позволяет создать удобный и интуитивно понятный интерфейс для работы с геоданными, который может быть доступен через браузер. Это особенно важно для предприятий, где сотрудники из разных подразделений должны иметь доступ к геопространственной информации.

5. *GRASS GIS* (*Geographic Resources Analysis Support System*) – это мощная *open-source* система для анализа геопространственных данных. Она предоставляет широкие возможности для обработки растровых и векторных данных, а также для выполнения сложных пространственных анализов, таких как моделирование рельефа, гидрологический анализ и анализ изменений земного покрова.

В корпоративной ГИС *GRASS GIS* может быть использован для выполнения специализированных аналитических задач, таких как прогнозирование рисков, планирование инфраструктуры или мониторинг природных ресурсов. Система поддерживает интеграцию с другими *open-source* инструментами, такими как *QGIS* и *PostGIS*, что делает ее универсальным решением для анализа данных.

6. *GDAL* (*Geospatial Data Abstraction Library*) и *OGR* (*Simple Features Library*) – это *open-source* библиотеки для работы с растровыми и векторными геоданными. Они поддерживают множество форматов данных и предоставляют инструменты для конвертации, обработки и анализа данных.

В корпоративной ГИС *GDAL/OGR* могут быть использованы для автоматизации процессов обработки данных, таких как конвертация форматов, обработка больших объемов данных или интеграция с другими системами. Эти библиотеки могут быть интегрированы в пользовательские приложения или использованы в скриптах для выполнения рутинных задач.

В целом, комбинаций элементов, используемых для формирования геоинформационной системы предприятия может быть множество. Для определенных типов задач возможно использование нескольких схожих по функционалу программ одновременно. К примеру, в качестве настольного приложения для работы с геопространственными данными у одного и того же специалиста на рабочем месте могут быть установлены одновременно бесплатный *QGIS* и платное отечественное ПО, такое как *NextGIS* [2].

*Обменный формат данных ЦИМ и ГИС.* В качестве обменного формата ЦИМ чаще всего используется *IFC*. В российском законодательстве формат *IFC* закреплён на уровне

Национального стандарта ГОСТ Р 10.0.02-2019/ИСО 16739-1:2018 «Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства» [3].

Формат *IFC* (*Industry Foundation Classes*) – это открытый стандарт для обмена данными в строительной отрасли, разработанный *buildingSMART* [4], который:

- поддерживает объектно-ориентированную структуру (стены, трубы, оборудование);
- позволяет хранить атрибутивную информацию (материалы, свойства объектов);
- совместим с российскими нормативными требованиями.

С тенденцией перехода сервисов в облачные решения, начали появляться библиотеки открытого доступа и бесплатные программы по работе с *BIM*-моделями в *web*, такие как «*IFC.JS*» [5, 6].

«*IFC.JS*» даёт возможность *BIM*-специалистам или разработчикам из других сфер создавать собственные *BIM*-решения для различных бизнес-задач.

*IFC.js* – это библиотека *JavaScript* для работы с моделями *IFC* в браузере. Она полностью бесплатная и распространяется по свободной лицензии *MIT*.

Библиотека *IFC.js* является мультиязычной и состоит из трёх основных компонентов:

- *web-ifc* – ядро библиотеки. Отвечает непосредственно за чтение формата *IFC*;
- *web-ifc-three* – компонент отвечает за создание и отображение 3D-сцены из считанных ядром *web-ifc* данных;
- *web-ifc-viewer* – браузерный просмотрщик 3D-сцен, полученных после обработки предыдущими двумя компонентами. Кроме непосредственной визуализации, возможно дополнить окно пользователя готовыми базовыми инструментами работы с цифровой информационной моделью.

## Практическая реализация

Для охвата максимального числа сотрудников различных подразделений предприятия чаще всего используется веб-порталы. В части получения справочной геоинформационной информации этот вариант наиболее удобен и имеет массу преимуществ. Для доступа к основной информации из 3D-моделей, также возможен и наиболее прост для большинства пользователей, так как не будет требовать установки дополнительных программ.

Учитывая то, что в принятом порядке создания трехмерных моделей и прочей документации первоочередным является создание трехмерной информационной модели и уже после следует этап генерации из нее и получения двумерных данных – 3D-модель является первоисточником информации о геометрии объектов с максимальной точностью.

При объединении геоинформационных систем классического 2D-представления с трехмерными информационными моделями первоочередная задача – это связывание атрибутивной информации как в одну сторону, так и в другую.

*Синхронизация атрибутивной информации между ЦИМ и ГИС*. Перенос информации из справочной информационной системы или ГИС в 3D-модель, зачастую не требуется, но в случае выявления ошибок или устаревших данных в трехмерном представлении потребуется перестройка трехмерной модели.

В данном случае возможно два подхода:

– корректировка существующего обменного файла и дальнейший перенос информации в среду разработки трехмерных информационных моделей с дальнейшей корректировкой файла исходного проекта, проверки на коллизии и прочие моменты;

– формирование отчетных лог-файлов по итогам сравнения модели и объектов. В них будет отображена информация об объекте и нестыковках в данных в других информационных системах для того, чтобы в дальнейшем специалисты могли скорректировать и определить тот источник данных, который является некорректным по той или иной причине.

Создание именно отчетного варианта для дальнейшей проверки конкретными специалистами, которые отвечают за целостность и корректность информации в базе, авторам

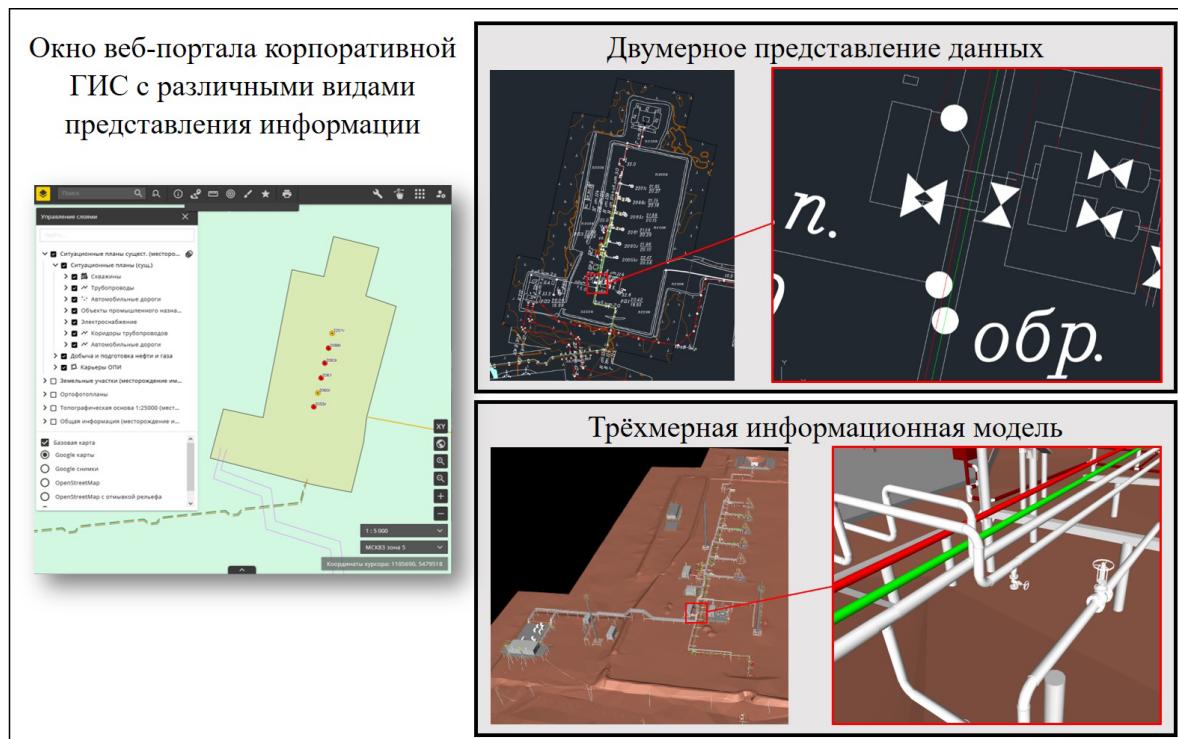
статьи видится наиболее подходящим, учитывая тот факт, что не каждый пользователь информационной системы обладает необходимыми навыками и знаниями по обработке геопространственной информации.

В случае возникновения ошибок именно специалисты в области *GIS* и *3D* моделирования могут четче сформулировать и определить источник проблем. Опять же, способ проверки вручную всех объектов именно специалистами в области *GIS* и *BIM* является крайне трудозатратным, и подключение конечных пользователей к своеобразному тестированию, имеющихся данных в системе, является предпочтительным способом выявления ошибок.

*Представление объекта в ЦИМ и ГИС на примере нефтепровода.* На территории нефтяного месторождения находится большое количество различных производственных объектов, как линейных, так и площадных. Линейные объекты являются протяженными и не столь интересны, для *3D*-моделирования в первую очередь. Площадные объекты несут в себе гораздо больший интерес для большого круга специалистов предприятий нефтегазового сектора. На площадном объекте, в свою очередь, находятся различные коммуникации, производственные объекты.

Взяв, к примеру, нефтяную трубу, которая на чертежах мелкого масштаба может быть представлена единым объектом с одним идентификатором, но при более детальном рассмотрении, в частности в *3D* модели, труба представляет собой набор отдельных элементов, таких как прямые сегменты трубы, поворотные сегменты, оборудование, находящееся на данной трубе, такие как датчики, задвижки и прочее (рис. 1). У всех этих частей конкретной трубы в *3D*-модели прописаны свои уникальные элементы, уникальные идентификаторы, при этом родительским является ось трубы, которая как бы группирует все остальные элементы.

При подключении к базе данных и визуализации всех этих элементов в виде иерархического дерева, понимая, что к чему относится, мы можем получить гораздо больше информации и иметь более четкое представление о тех задачах, которые необходимо выполнить для заданного сегмента нефтепровода.



**Рис. 1. Пример визуализации данных в 2D и 3D**  
*Fig. 1. Example of 2D and 3D data visualization*

*Реализация механизма синхронизации данных.* Безусловно, разработка механизма синхронизации данных потребует внесение изменений в структуру и наполнение баз данных.

Информационный массив, включающий в себя разнородную информацию, необходимую для управления объектами нефтегазовой отрасли, можно представить в следующем виде:

$$S = \{I_{\text{ИС}} \cup I_{\text{ГИС}} \cup I_{\text{ЦИМ}}\},$$

где  $I_{\text{ИС}}$  – информация об объекте в специализированной информационной системе;  $I_{\text{ГИС}}$  – информация об объекте в геоинформационной системе;  $I_{\text{ЦИМ}}$  – информация об объекте в трёхмерной информационной системе.

Для связывания двумерного и трёхмерного представлений объектов потребуется внесение в базу геоданных ссылок на обменный 3D-файл. Учитывая, что ссылка на 3D-файл может со временем измениться в связи с дополнениями основной модели, наиболее оптимальным является вариант создания дополнительного полигонального слоя с нанесёнными границами имеющихся трёхмерных моделей и актуальных ссылок на текущие обменные файлы. Это позволит сократить время на поиск объектов на карте потенциально имеющих объемное представление в 3D-файле путём применения инструмента геопространственного поиска пересекающихся с границами имеющихся трёхмерных объектов.

Также, что является наиболее важным не только для синхронизации данных 2D и 3D, но и для всей информационной структуры предприятия, необходимо обеспечить внесение в базу уникального идентификатора (*UID*). Внесение *UID*, который будет являться единственным для конкретного объекта на протяжении всего его жизненного цикла, позволит в дальнейшем максимально упростить процедуру формирования единого информационного пространства предприятия. В качестве существующего аналога *UID* в любой фирме можно назвать инвентарные номера, наносимые на мебель и технические средства. При этом, к примеру, службы материально-технического обеспечения могут продолжать работать с уже сформированными инвентарными номерами в программных продуктах учета, а поле с *UID* будет внесено в базу данных в качестве дополнительного.

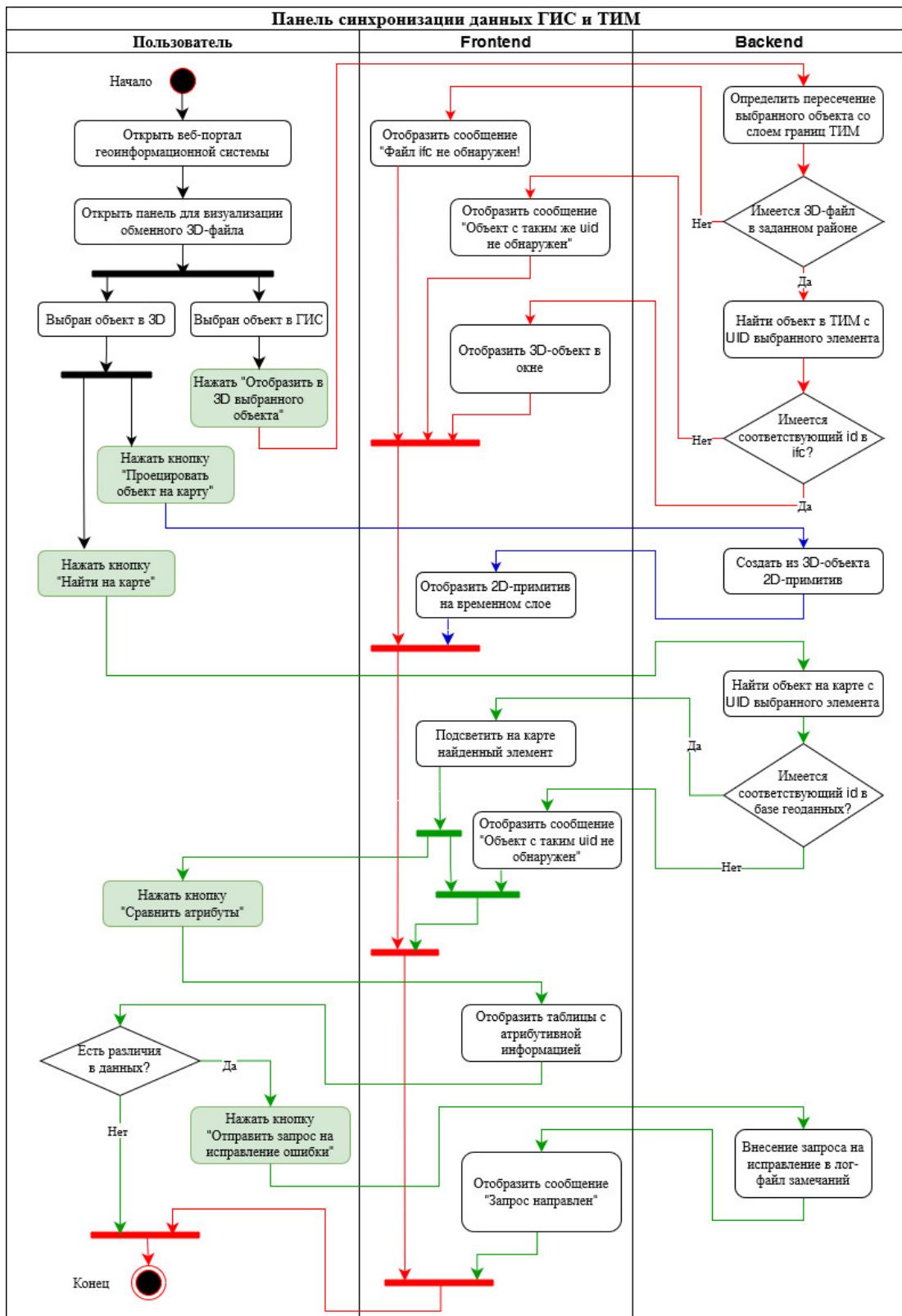
При создании ЦИМ на этапе проектирования *UID* задается сразу и в дальнейшем используется в других системах. В том случае, если ЦИМ создаётся на этапе эксплуатации *UID* следует вносить в модель из корпоративной геоинформационной базы данных или любой другой информационной системы предприятия.

Порядок взаимодействия пользователя с КГИС для поиска соответствующих объектов в двумерном и трёхмерном представлении в общем виде представлен на активити-диаграмме (рис. 2).

## Заключение

Вопрос совместного использования цифровых информационных моделей и существующих в организации геопространственных данных является в данный момент особенно актуальным. Учитывая стоимость разработки ЦИМ и тенденцию к максимальному извлечению пользы из имеющихся нематериальных активов, к коим можно отнести ЦИМ, требуется дальнейшая проработка механизмов синхронизации данных и доступа пользователей организации к ним.

Предложенный в статье подход позволяет: устраниТЬ рассогласование между геопространственными данными и ЦИМ; снизить трудозатраты за счет автоматизации; обеспечить максимальное число сотрудников простым доступом к трёхмерной информации о промышленных объектах.



**Рис. 2. Активити-диаграмма последовательности действий пользователя КГИС**  
*Fig. 2. Sequence of action activity diagram for CGIS user*

Перспективы работы включают развитие библиотек 3D-объектов и углубленную интеграцию с различными системами предприятия, в том числе с IoT-системами [7] для мониторинга инфраструктуры, что позволит предотвращать и минимизировать потенциальный ущерб в случае чрезвычайных ситуаций, оперативно реагируя на изменения различных параметров, таких как уровень задымленности, радиационного фона, температуры, освещённости.

### **Список источников:**

1. Дмитриев А., Тамбовцева Т., Папикян Л., Цыганкова А. Современный опыт инновационного развития строительства на основе технологий информационного моделирования в России и за рубежом // Недвижимость: экономика, управление. – 2019. – с. 104-108.
2. NextGIS – готовое решение для работы с геоданными [Электронный ресурс], режим доступа: <https://nextgis.ru/>
3. ГОСТ Р 10.0.02-2019/ИСО 16739-1:2018 «Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства».
4. BuildingSMART – the International Alliance for Interoperability (IAI) [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.buildingsmart.org/>
5. Д.А. Кривошеев, Д.В. Блинова Формирование единого информационного пространства предприятия на основе интеграции геоинформационных систем и систем моделирования зданий и сооружений // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – vol. 13. – № 2.
6. Open source IFC implementation for C++ [Электронный ресурс], режим доступа: <https://ifcquery.com/>
7. К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина Цифровой двойник производства – средство цифровизации деятельности организации // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – № 2(04). – с. 11-17.

### **Информация об авторах:**

#### **Кривошеев Дмитрий Александрович**

аспирант кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики, Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), Россия, г. Уфа.

#### **Блинова Дарья Викторовна**

Кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики, Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ).

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 01.05.2025; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.**

**The article was submitted 01.05.2025; approved after reviewing 15.05.2025; accepted for publication 19.05.2025.**

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

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

### **References:**

1. Dmitriev A., Tambovtseva T., Papikyan L., Tsygankova A. Russian and Foreign Contemporary Experience in Implementation of Innovations in Construction Projects Using Information Modelling Technologies. Real Estate: Economics, Management. 2019;104-108.
2. NextGIS – Ready Solution for Working with Geodata [Internet]. Available from: <https://nextgis.ru/>
3. GOST R 10.0.02-2019/ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries.
4. BuildingSMART – International Alliance for Interoperability (IAI) [Internet]. Available from: <https://www.buildingsmart.org/>
5. Krivosheyev D.A., Blinova D.V. Formation of a Unified Information Space of an Enterprise Based on the Integration of Geographic Information Systems and Systems for Modelling Buildings and Structures. International Journal of Open Information Technologies. 2025;13:2.
6. Open Source IFC Implementation for C++ [Internet]. Available from: <https://ifcquery.com/>
7. Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishina T.G.. Enterprise Digital Twin – Instrument of Digitalization of the Activity of the Organization. Automation and Modelling in Design and Management. 2019;2(04):1-17.

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

#### **Krivosheyev Dmitry Aleksandrovich**

Postgraduate Student at the Department of Computer Engineering and Engineering Cybernetics of Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia.

#### **Blinova Darya Viktorovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Engineering Cybernetics of Ufa State Petroleum Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.056

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-74-82

## РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ МЕЖДУ РАБОТНИКАМИ ТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЕТОМ АСПЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**Наталья Михайловна Кузнецова<sup>1</sup>, Татьяна Владимировна Карлова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

<sup>2</sup> Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

<sup>1</sup> knm87@mail.ru

<sup>2</sup> karlova-t@yandex.ru

**Аннотация.** Целью является создание методики рационального распределения задач бизнес-процессов транспортного предприятия между работниками, учитывающей аспекты информационной безопасности. Для достижения поставленной цели представлены результаты анализа основных управленческих ошибок при распределении задач между работниками транспортного предприятия. Также приведены результаты анализа недостатков проектного подхода, рассмотрены основные последствия ошибок: перегрузка работников, снижение уровня информационной безопасности. Новизной является предложенная креативная концепция последовательного анализа глобальной задачи на составляющие и синтеза решений подзадач с применением механизмов защиты ресурсов. Результатом исследования являются рекомендации по применению предложенной методики распределения задач в основных бизнес-процессах транспортного предприятия.

**Ключевые слова:** автоматизация, управление, рационализация бизнес-процессов, оптимизация распределения трудовых ресурсов, защита информации, информационная безопасность

**Для цитирования:** Кузнецова Н.М., Карлова Т.В. Рационализация распределения задач бизнес-процессов между работниками транспортного предприятия с учетом аспектов информационной безопасности // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 74-82. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-74-82.

Original article

Open Access Article

## RATIONALIZING BUSINESS PROCESS TASK DISTRIBUTION AMONG A TRANSPORT ENTERPRISE'S EMPLOYEES CONSIDERING INFORMATION SECURITY ASPECTS

**Nataliya M. Kuznetsova<sup>1</sup>, Tatyana V. Karlova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State University of Technology «STANKIN».

<sup>2</sup> Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences

<sup>1</sup> knm87@mail.ru

<sup>2</sup> karlova-t@yandex.ru

**Abstract.** The aim is to develop a methodology for rational distribution of tasks in business processes at transport enterprises among employees while considering information security aspects. To achieve this goal, the paper presents the results from analysing major management errors when distributing tasks among employees at transport companies. Additionally, the work analyses deficiencies of the project-based approach and highlights the main consequences of these errors, including employees' overloading and reduced levels of information security. The novelty lies in proposing a creative concept of sequential global task decomposition followed by the synthesis of subtask solutions using resource protection mechanisms. As a result, the study formulates recommendations on applying the proposed method for task distribution within key business processes at transport enterprises.

**Keywords:** automation, management, business process optimization, labour resource allocation optimization, information protection, information security

---

**For citation:** Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Rationalizing Business Process Task Distribution Among a Transport Enterprise's Employees Considering Information Security Aspects. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 74-82. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-74-82.

## Введение

Современные промышленные предприятия сталкиваются с проблемой оптимального распределения задач между работниками. В настоящее время существует несколько вспомогательных механизмов – трекеров задач. Однако применение данных программных решений без дополнительных организационных методов распределения заданий между работниками не имеет смысла. В статье представлен комплекс рекомендаций по распределению заданий между работниками предприятия. Особое внимание в статье уделено применению проектного подхода при достижении целей предприятия и аспектам информационной безопасности.

### Цель рационализации распределения задач между работниками транспортного предприятия

Основной целью рационализации распределения задач между работниками транспортного предприятия является качественное выполнение максимального количества заданий в срок при условии сохранения высокого уровня информационной безопасности.

При этом целевая функция оптимизации предполагает максимизацию уровня качества выполнения заданий при минимизации времени их выполнения.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- распределение задач согласно квалификации работников;
- рациональное распределение задач по времени;
- сохранение физического и психологического здоровья работников;
- рациональное распределение финансовых и материально-технических ресурсов предприятия;
- сохранение высокого уровня защиты ресурсов транспортного предприятия.

### Анализ основных ошибок управляющих среднего звена на современных транспортных предприятиях

Основными ошибками управляющих среднего звена являются:

- ошибки, приводящие к перегрузке работников:
  - а) одновременное использование нескольких вспомогательных автоматизированных систем (АС) назначения задач (трекеров задач: *Redmine* [1], *RocketChat* [2], *P7* [3], *GitLab* [4] и т.д.);
  - б) применение избыточного количества методов контроля;
  - в) попытки распараллеливания бизнес-процессов (БП), которые могут быть выполнены исключительно в последовательном порядке;
  - г) частое изменение требований к срочности выполнения задач (частое изменение статуса срочности задач);
  - д) частое изменение постановки задач;
  - е) назначение одновременно нескольких задач на одного работника-исполнителя (данная ошибка часто возникает при проектном подходе);
- ошибки, приводящие к недогрузке работников:
  - а) отсутствие должного уровня контроля всех работников;
  - б) перенесения внимания руководства только на одну задачу (на одну группу исполнителей);
  - в) ошибки при приеме на работу (неквалифицированных, необучаемых, немотивированных и т.д. работников);

- г) отсутствие благоприятного климата в коллективе;
- д) отсутствие лидерских качеств у руководителя;
- е) нерациональное поведение руководителя (частое перераспределение ответственных за задачи, слишком гибкое управление и т.д.).

*Анализ ошибки «Использование нескольких вспомогательных автоматизированных систем назначения задач».* Использование нескольких вспомогательных АС назначения задач приводит к тому, что работник предприятия может не заметить поступление новой задачи, а также забыть проверить один из трекеров [1 – 4].

Однако самыми опасными последствиями применения такого подхода являются:

- потеря внимательности работника при выполнении задач (ввиду того, что он постоянно должен отвлекаться на проверку трекеров);
- повышение уровня нервозности (стресса) работника;
- понижение уровня психологической стабильности;
- снижение мотивации работника (внутренний фактор мотивации) [5 – 8].

*Анализ ошибки «Применение избыточного количества методов контроля».* Контроль, как метод управления качеством, является обязательным к применению на каждом этапе жизненного цикла (ЖЦ) производства [5 – 8]. Однако частой ошибкой управляющих среднего звена является чрезмерное использование методов контроля.

Работники предприятия воспринимают избыточный контроль как недоверие и давление со стороны руководства. При этом также снижается мотивация (внутренний фактор мотивации), повышается уровень тревожности (стресса).

*Анализ ошибки «Попытки распараллеливания этапов бизнес-процессов, которые могут быть выполнены исключительно в последовательном порядке».* Попытки распараллеливания БП, которые могут быть выполнены исключительно в последовательном порядке, являются ярчайшим примером отсутствия компетенции у управляющего среднего звена. Непонимание того, что при решении некоторых задач физически невозможно начать следующий этап БП без завершения предыдущего, приводит к фатальным последствиям.

Результатом такого некомпетентного управления являются:

- «выгорание» компетентных и добросовестных работников (вплоть до увольнений);
- некачественное выполнение работ на отдельных этапах БП вследствие «погони за сроками»;
- задача не только не решена в срок, она «в принципе» не может быть решена при таком подходе.

На рис. 1 – 3 представлены временные диаграммы распределения задач при отсутствии распараллеливания и при попытках распараллеливания этапов БП:

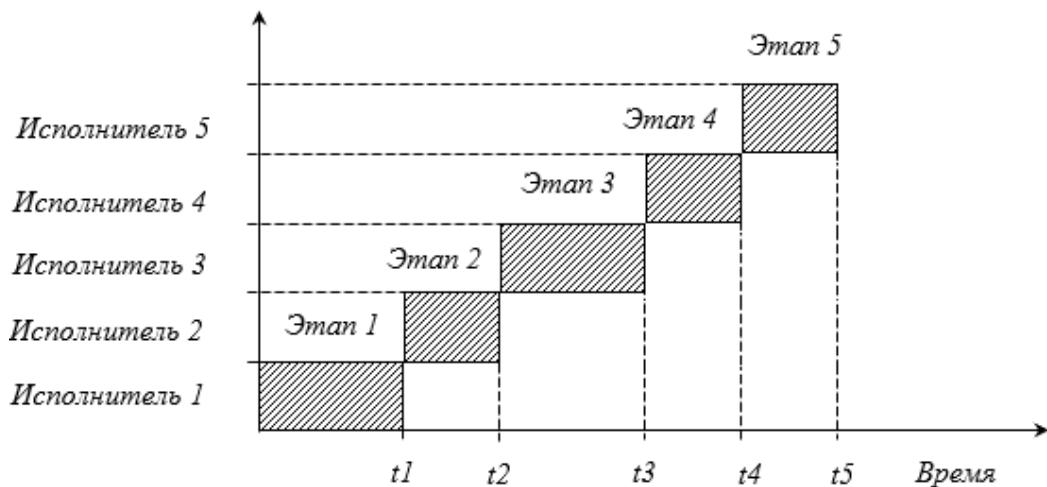


Рис. 1. Временная диаграмма при отсутствии распараллеливания  
Fig. 1. Timing diagram without parallelization

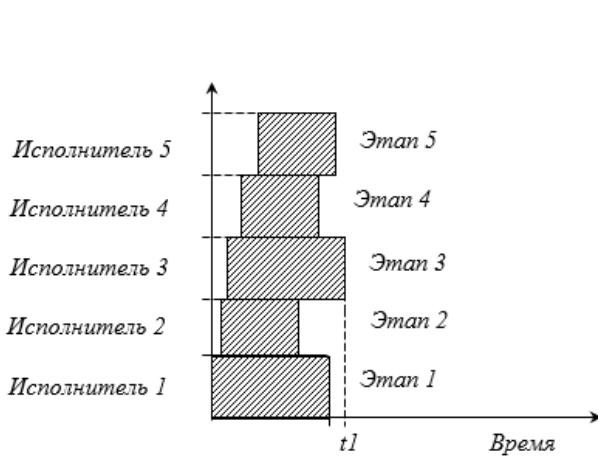


Рис. 2. Временная диаграмма при ошибке распараллеливания

Fig. 2. Timing diagram for parallelization error

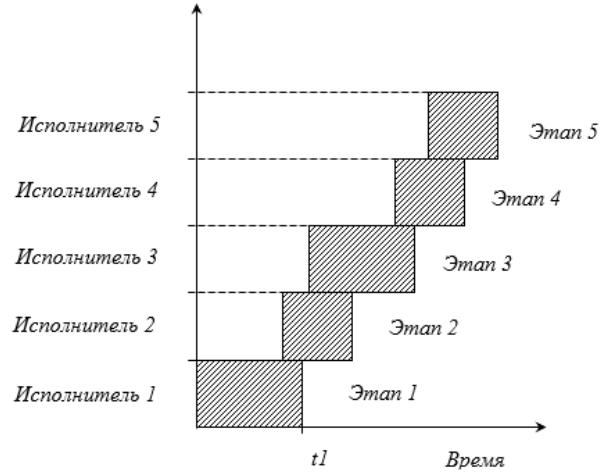


Рис. 3. Возможное решение задачи распараллеливания

Fig. 3. Possible solution to the parallelization problem

Важно отметить, что в качестве исполнителя может быть один работник, либо коллектив. На рис. 4, 5 представлены причинно-следственные диаграммы нерационального распределения задач между работниками.

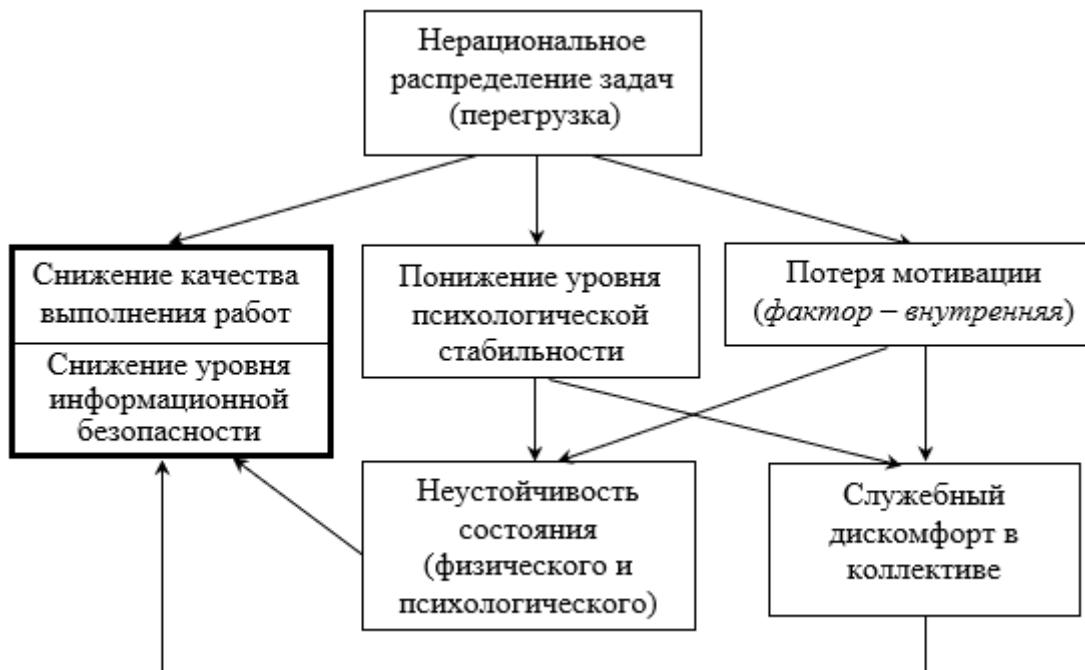


Рис. 4. Причинно-следственная диаграмма нерационального распределения задач вследствие ошибок перегрузки исполнителей

Fig. 4. Cause-and-effect diagram of irrational distribution of tasks due to errors of overloading performers

### Анализ недостатков проектного подхода

Главным недостатком проектного подхода является высокая вероятность нарушения целеполагания вследствие нерационально принятых управленческих решений: нечеткого распределения функциональных обязанностей при управлении, которое приводит к максимальной перегрузке одних работников-исполнителей и недогрузке других.



Рис. 5. Причинно-следственная диаграмма нерационального распределения задач вследствие ошибок недогрузки исполнителей

Fig. 5. Cause-and-effect diagram of irrational distribution of tasks due to errors of underloading of performers

Основной отличительной особенностью проектного подхода является гибкое распределение трудовых ресурсов относительно проектов транспортного предприятия.

При этом часто возникает ситуация, при которой один сотрудник задействован в нескольких проектах (как в роли исполнителя, так и в роли руководителя). Это приводит сразу к нескольким последствиям, приводящим к снижению качества работ:

- «наложение» блоков работы (этапов) разных проектов друг на друга – необходимость выполнения работ одновременно по нескольким проектам для одного работника-исполнителя (в режиме «аврала») (рис. 6);

- превращение исполнителя в «слугу нескольких господ» – иерархичность управления превращается из древовидной в сетевую структуру (рис. 7). Это происходит именно вследствие «гибкого» назначения ответственных за каждый проект;

- неразбериха и путаница при управлении: например, работник 1 может оказаться исполнителем в проекте А и одновременно руководителем в проекте Б, в то время как работник 2 быть руководителем в проекте А и исполнителем в проекте Б. Данная ситуация может привести к «зацикливанию» процесса управления.

Согласно рис. 6, в период с  $t_1 < t < t_2$  один работник-исполнитель вынужден выполнять свои обязанности сразу на пяти проектах – успеть выполнить все задачи в режиме «аврала».

Согласно рис. 7, при классическом подходе у каждого исполнителя только один руководитель среднего звена. В проектном подходе для каждого исполнителя количество руководителей равно количеству проектов. Таким образом, возникает возможность появления противоречий управления вследствие разницы управленческих решений, принятых несколькими руководителями среднего звена. Может возникнуть ситуация, при которой у работника (в рамках нескольких проектов) будут «противоположные» задания.

Кроме того, ввиду гибкости проектного подхода, может оказаться, что исполнитель проекта А будет руководителем проекта Б, в то время как исполнитель проекта Б будет руководителем проекта А, что несомненно приведет к путанице и коллизии управления.

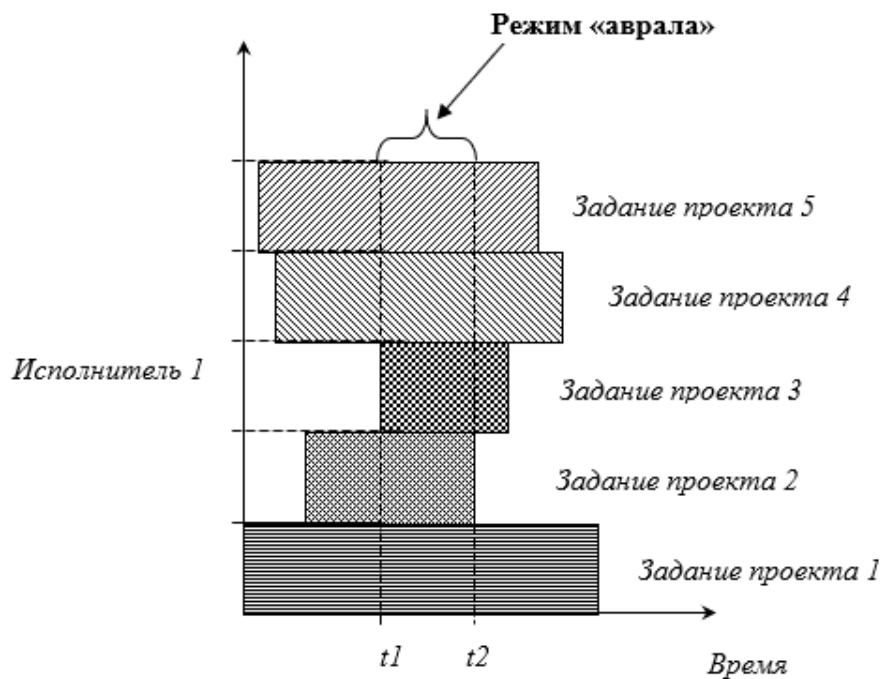


Рис. 6. Временная диаграмма работ одного исполнителя, занятого в нескольких проектах одновременно  
Fig. 6. Time diagram of the work of one performer engaged in several projects simultaneously

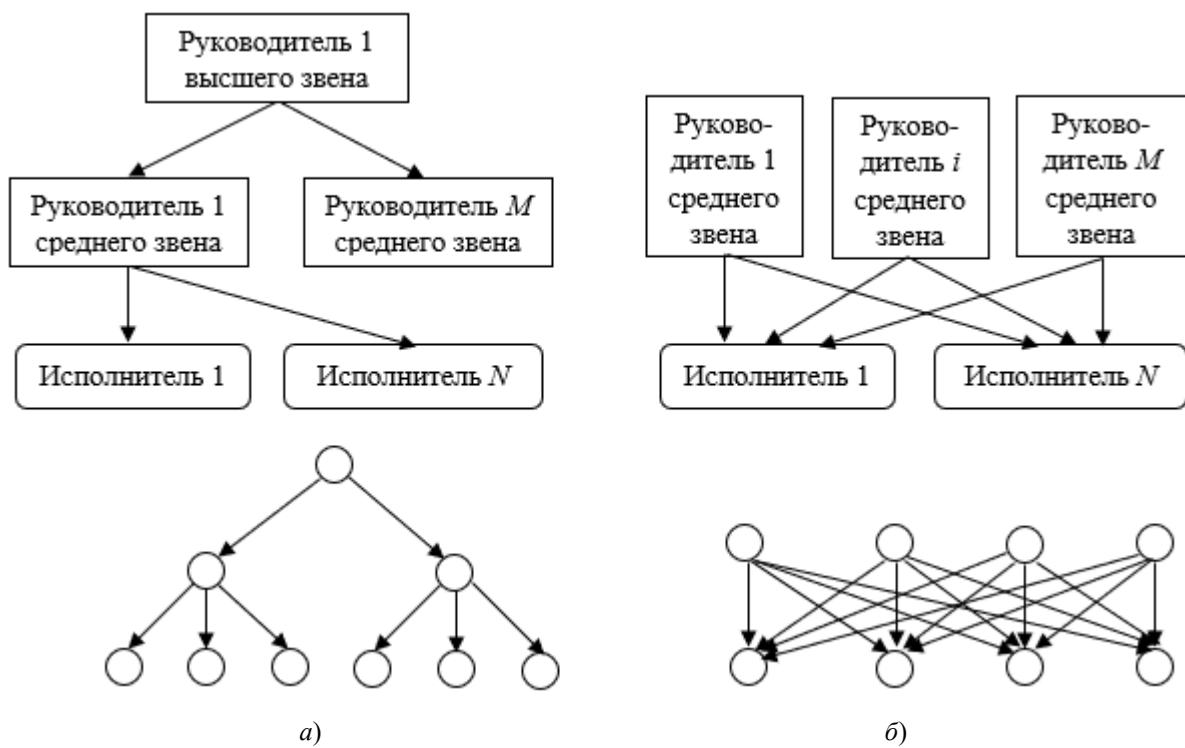


Рис. 7. Иерархичность управления:  
а – классический подход (структура – дерево); б – проектный подход (структура – сеть)  
Fig. 7. Management hierarchy:  
a – classical approach (structure – tree); b – project approach (structure – network)

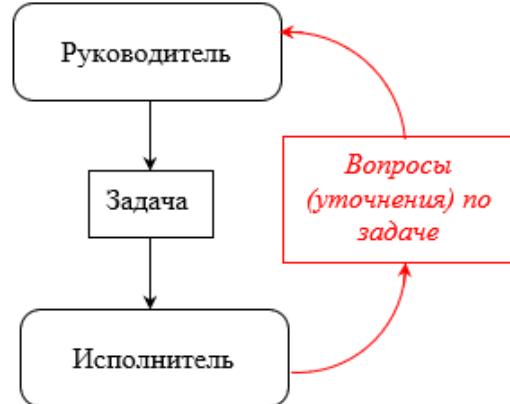
### Последствия ошибок, приводящих к перегрузке работников

Основными последствиями ошибок перегрузки работников являются:

- нарушение коммуникации между работниками;
- а) боязнь обратиться за помощью;
- б) возникновение конфликтных ситуаций и т.д.;
- нарушение обратной связи «руководитель – исполнитель»;

- а) боязнь обратиться за помощью;
- б) умалчивание ошибок;
- в) прокрастинация;
- г) увеличение количества нерешенных вопросов и т.д.;
- снижение качества принятия управленческих решений.

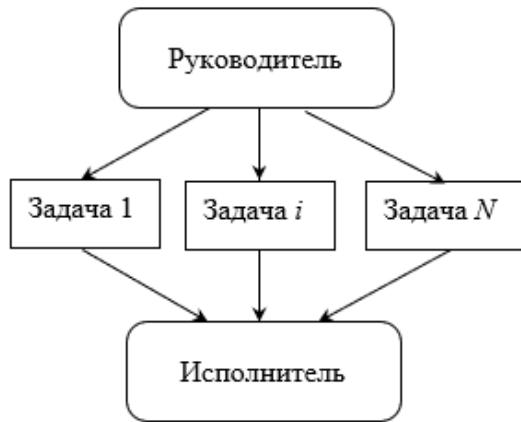
На рис. 8 представлена схема нарушения обратной связи «руководитель – исполнитель».



**Рис. 8. Схема нарушения обратной связи «руководитель – исполнитель»**  
*Fig. 8. Diagram of the violation of the feedback «manager – performer»*

Согласно рис. 8, нарушается обратная связь по задаче: работник боится, стесняется, не хочет лишний раз обращаться к начальнику с вопросом и (или) уточнением по задаче. В результате теряется временной ресурс, отношения еще больше «накаляются», теряется качество выпускаемой продукции.

На рис. 9 представлена схема нарушения, приводящая к перегрузке руководителя как лица принимающего управленческое решение [9], а также к перегрузке исполнителя, вынужденного выполнять несколько задач одновременно.



**Рис. 9. Схема нарушения, приводящая к перегрузке руководителя и исполнителя**  
*Fig. 9. Scheme of violation leading to overload of the manager and performer*

Таким образом, повышается нагрузка на всех работников предприятия: как на руководителей, так и на исполнителей. Это приводит к увеличению количества ошибок, ухудшению психологического климата, снижению уровня качества выпускаемой продукции, а также к увеличению риска реализации угроз информационной безопасности – повышению уровня уязвимости стратегически важных ресурсов транспортного предприятия [10 – 12].

### **Методика последовательного анализа и синтеза задач при их распределении между работниками предприятия**

С целью сохранения основных характеристик безопасности стратегически важных ресурсов транспортного предприятия: конфиденциальности, целостности, доступности, руководителям подразделений необходимо уметь рационально распределять задачи

основных БП: рационально проводить анализ задач; рационально проводить синтез подзадач.

На рис. 10 представлен схема последовательного анализа и синтеза задач БП промышленного предприятия.

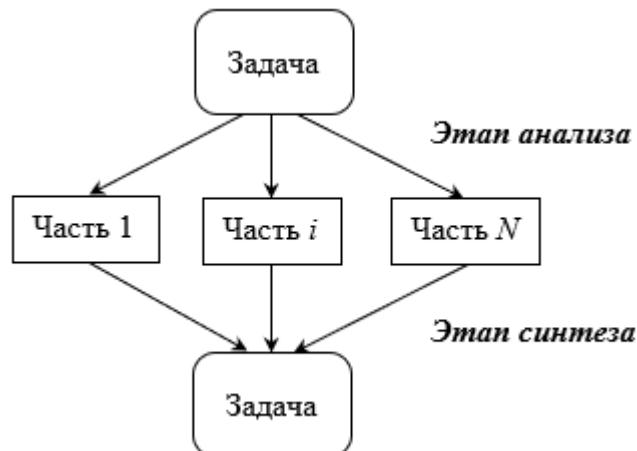


Рис. 10. Схема последовательного анализа и синтеза задач БП транспортного предприятия  
Fig. 10. Scheme of sequential analysis and synthesis of tasks of the transport enterprise business process

С точки зрения сохранения конфиденциальности ресурсов транспортного предприятия: в схеме, представленной на рис. 10, весь объем конфиденциальных данных (описание задачи в целом) знает только работник-руководитель, работники-исполнители знают только части конфиденциальных данных (в рамках подзадач). Таким образом повышается уровень информационной безопасности.

Кроме того, при данном подходе ввиду «наглядности», простоты и прозрачности целеполагания минимизируются ошибки перегрузки и недогрузки работников-исполнителей: руководитель четко отслеживает, сколько задач и по каким проектам он назначил тому или иному работнику-исполнителю.

## Выводы

Таким образом, проведенный анализ показал, что основными ошибками при распределении задач между работниками транспортного предприятия являются: использование нескольких вспомогательных АС – трекеров задач, применение избыточного или недостаточного количества методов контроля, попытки избыточного распараллеливания БП, а также нерационального применения проектного подхода.

Основным решением рассмотренной проблемы является методика последовательного применения анализа глобальных задач и синтеза подзадач. Кроме того, методика позволит повысить уровень информационной безопасности ресурсов транспортного предприятия за счет сохранения их конфиденциальности и целостности.

### Список источников:

1. Redmine [Электронный ресурс] – режим доступа URL: <https://www.redmine.org> (дата обращения: 11.02.2025).
2. RocketChat [Электронный ресурс] – режим доступа URL: <https://www.rocket.chat> (дата обращения: 11.02.2025).
3. Р7-Офис-российский офисный пакет [Электронный ресурс] – режим доступа URL: <https://r7-office.ru> (дата обращения: 11.02.2025).
4. GitLab [Электронный ресурс] – режим доступа URL: <https://about.gitlab.com> (дата обращения: 11.02.2025).
5. Ефимов В.В. Средства и методы управления качеством: учебное пособие. – М.: КНОРУС, 2007. – 232 с.

### References:

1. Redmine [Internet] [cited 2025 Feb 11]. Available from: <https://www.redmine.org>
2. RocketChat [Internet] [cited 2025 Feb 11]. Available from: <https://www.rocket.chat>
3. R7 Office – Russian Office Software Suite [Internet] [cited 2025 Feb 11]. Available from: <https://r7-office.ru>
4. GitLab [Internet] [cited 2025 Feb 11]. Available from: <https://about.gitlab.com>
5. Efimov V.V. Means and Methods of Quality Management. Moscow: Knorus; 2007.

6. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В. Компьютерные системы управления производством. Учебное пособие. – М.: Янус-К, 2024. – 120 с.

7. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В. Всеобщее управление качеством. Решение задачи повышения уровня информационной безопасности в рамках комплексного обеспечения качества на промышленном предприятии (Курс лекций, лабораторный практикум). Учебное пособие. – М.: Янус-К, 2019. – 64 с.

8. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В. Управление, моделирование и анализ производственных бизнес-процессов. Учебное пособие. – М.: Янус-К, 2021. – 108 с.

9. Сапольски Р. Биология добра и зла: Как наука объясняет наши поступки; Пер. с англ. – М.: Альпина нон-фикшн, 2021. – 766 с.

10. Кузнецова Н.М. Методология защиты от целевых кибератак повышенной сложности в автоматизированных системах промышленного предприятия (монография). – М.: «Янус-К», 2024. – 132 с.

11. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В., Бекмешов А.Ю. Классификация компьютерных атак на автоматизированные системы промышленных предприятий // Качество. Инновации. Образование. – 2019. – № 4 (162). – С. 54-59.

12. Кузнецова Н.М., Карлова Т.В., Бекмешов А.Ю. Проектирование вспомогательной автоматизированной системы принятия управленческих решений на основе анализа уровня информационной безопасности // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – № 3 (21). – С. 13-22.

6. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Computer Systems for Production Management. Moscow: Janus-K; 2024.

7. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Total Quality Management. Solving the Problem of Increasing the Level of Information Security at an Industrial Enterprise as Part of Quality Management System. Moscow: Janus-K; 2019.

8. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Management, Modelling and Analysis of Manufacturing Business Processes. Moscow: Janus-K; 2021.

9. Sapolsky R. Behave: The Biology of Humans at Our Best and Worst; translated from English. Moscow: Alpina Non-Fiction; 2021.

10. Kuznetsova N.M. Methodology of Protection Against Targeted Cyber Attacks of Increased Complexity in Automated Systems of an Industrial Enterprise. Moscow: Yanus-K; 2024.

11. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu. Classification of Computer Threads on Automated Factory Systems. Quality. Innovation. Education. 2019;4(162):54-59.

12. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu. Designing an Auxiliary Automated Management Decision-Making System Based on Information Security Level Analysis. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;3(21):13-22.

### Информация об авторах:

#### Кузнецова Наталия Михайловна

Кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

#### Карлова Татьяна Владимировна

Доктор социологических наук, кандидат технических наук, профессор, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

### Information about the authors:

**Kuznetsova Natalija Michajlovna** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Moscow State University of Technology «STANKIN»

**Karlova Tatyana Vladimirovna** Doctor of Sociological Sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Institute of Computer Aided Design 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 13.03.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принята к публикации 15.05.2025.**

**The article was submitted 13.03.2025; approved after reviewing 02.04.2025; accepted for publication 15.05.2025.**

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

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

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.9

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-83-90

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ БИБЛИОТЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СЛАБОВИДЯЩИХ ЛЮДЕЙ

Татьяна Александровна Онуфриева<sup>1✉</sup>, Наталья Александровна Борсук<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Россия

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

<sup>2</sup> borsuk65@yandex.ru

**Аннотация.** В современном мире достаточно высокими темпами растет количество слабовидящих людей. Круг общения у данной категории граждан ограничивается, возможность пользоваться современными гаджетами также уменьшается. Необходимо социализировать слабовидящих людей путем вовлечения их в работу библиотечных систем. В данных учреждениях эта категория граждан сможет не только тесно общаться друг с другом, но и пользоваться автоматизированными возможностями библиотек. Описаны основные этапы разработки специализированной библиотечной системы для слабовидящих, а именно: реализация синтаксического анализатора из многофункционального программного пакета ирбис, реализация модуля автоматизированной книговыдачи с разнообразными возможностями, реализация модуля голосового помощника для входа в библиотечную систему, реализация модуля новостного блока с функцией озвучивания, использование разработанного для специализированной системы графического редактора и другое. Рассматривается база данных специализированной библиотечной системы, прописаны поля таблиц баз данных. Приведен интерфейс панели администрирования. Также приведены задачи, реализуемые технологией обработки естественного языка (NLP). Анализ внедрения данной системы показал ее работоспособность в плане ускорения процесса книговыдачи слабовидящим людям, получения ими дополнительной информации. Автоматизированная система проходит тестирование и постоянную модернизацию.

**Ключевые слова:** специализированная библиотечная система, слабовидящие, синтаксический анализатор, голосовой помощник, NLP

**Для цитирования:** Онуфриева Т.А., Борсук Н.А. Разработка и внедрение специализированной библиотечной системы для слабовидящих людей // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 83-90. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-83-90.

Original article

Open Access Article

## DEVELOPING AND IMPLEMENTING A SPECIALIZED LIBRARY SYSTEM FOR VISUALLY IMPAIRED INDIVIDUALS

Tatyana A. Onufrieva<sup>1✉</sup>, Natalia A. Borsuk<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

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

<sup>2</sup> borsuk65@yandex.ru

**Abstract.** In the modern world, the number of visually impaired people is growing at a high rate. The social circle of this category of citizens is limited; the ability to use modern gadgets is also reduced. It is necessary to socialize visually impaired people by involving them in the library system work. In these institutions, this category of citizens will be able not only to closely communicate with each other, but also to use the automated capabilities of libraries. The paper describes the main stages of developing a specialized library system for the visually impaired people. The list includes the following implementations: a syntax analyser from the multifunctional software package irbis, an automated book-lending module with various capabilities, a voice assistant module for entering the library system, a news block module with a voice-over function, a graphic editor developed for a specialized system, etc. The work considers the database of a specialized library system, prescribes the database table fields; provides the interface of the administration panel and the tasks implemented by the technology of natural language processing (NLP). The analysis of implementing this system shows its efficiency in terms of accelerating the process of book lending to visually impaired people, obtaining additional information. The automated system is being tested and constantly upgraded.

**Keywords:** specialized library system, visually impaired, syntactic analyser, voice assistant, NLP

**For citation:** Onufrieva T.A., Borsuk N.A. Developing and Implementing a Specialized Library System for Visually Impaired Individuals. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 83-90. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-83-90.

---

---

## **Введение**

В настоящее время в России насчитывается большое число слабовидящих людей. Специалисты аналитического бюро *GxP News* провели исследование [1] в данном вопросе и компания насчитала в России около 5,9 млн незрячих или слабовидящих людей. Официальную инвалидность по зрению, согласно статистике, имеют более трехсот тысяч жителей страны. К 2025 году число слабовидящих может увеличиться и достигнуть 6,2 млн человек, предположили аналитики. Прогноз они составили в том числе с учетом демографических данных Росстата.

Сегодня сеть специальных библиотек РФ для людей, полностью или частично утративших зрение, состоит из 72-х региональных (областных, краевых, республиканских) библиотек [3]. В общей сложности библиотеки для слепых обслуживаются более 162-х тыс. читателей, совокупный книжный фонд составляет более 8-ми млн. экземпляров, электронный фонд – более 1,7 млн. книг, книговыдача – более 9-ти млн. экземпляров [2].

Забота о таких людях легла на плечи нашего государства. По всей России создаются специализированные библиотеки, открытые для посещения слабовидящими и полностью потерявшими зрение людьми. Функционал таких специализированных учреждений может быть различным в зависимости от территориального нахождения, количества зарегистрированных в ней человек, от степени финансирования и прочего.

Новым в развитии библиотек для слепых на современном этапе является трансформация библиотек в Центры информации, образования и досуга инвалидов [3]. Одним из направлений социальной реабилитации слабовидящих людей является и создание Интернет-сообществ, и использование данной категории граждан специализированных библиотечных систем с предоставлением различного рода информации.

В работе В.В. Алексеева и О.В. Дубровиной [4] описана модель процесса адаптации электронных информационных ресурсов к потребностям слабовидящих и незрячих пользователей. Эта модель наглядно показывает необходимость совокупности аппаратных средств в организации функционирования специализированной библиотечной системы и ряда адаптивных средств для общения пользователей и использования ими информационных ресурсов.

Информационных ресурсов для слабовидящих людей разработано немало. Можно привести в пример официальный сайт общероссийской общественной организации инвалидов «Всероссийское ордена Трудового Красного Знамени общество слепых», официальный портал «Компьютерные технологии для незрячих и слабовидящих», сайты голосовых технологий для незрячих людей, портал речевых технологий, сайт Российской государственной библиотеки для слепых (РГБС) и многое другое [5]. Функционал различен в зависимости от предназначения информационного ресурса. Например, на сайте РГБС присутствуют разделы электронного каталога, информационных ресурсов, просмотра издательской деятельности библиотеки, есть возможность выбора типа книги, прослушивания интернет-радио, просмотра свежих новостей, анонса мероприятий и т.п. На сайте «Тактильное виденье» представлена новая концепция визуально-замещающих аппаратов – заменителей зрения, новый запатентованный метод кодирования и передачи сигнала. Сайт Ростовской областной библиотеки для слепых позволяет ознакомиться с деятельностью специализированной библиотеки, с предоставляемыми услугами, каталогом книг и с творчеством читателей.

## **Основная часть**

В статье рассмотрим разработку специализированного программного обеспечения библиотеки для слепых им. Н. Островского в городе Калуге.

Читателю может просто понадобиться воспользоваться библиотечным фондом, получив требуемую книгу или на бумажном носителе, или на специальной бумаге, выбитой шрифтом Брайля, или в аудиоформате на тифлоносителе. А возможны ситуации, когда слабовидящий читатель просто хочет ознакомиться с функционалом различных специализированных библиотек и воспользоваться какими-то их услугами в онлайн режиме. В этом случае можно говорить о целесообразности наличия у библиотеки своего сайта с различной наполняемостью. На данных сайтах может быть, как общая информация о библиотеках, так и ин-

формация о библиотечном книгофонде, информация о текущих проводимых мероприятиях и прочее. Все это рассматривается с точки зрения предоставления слабовидящему читателю каких-либо услуг. Например, сайт Калужской областной специальной библиотеки для слепых имени Н. Островского, согласно интегрированному на сайт счетчику, посетило 232 172 человека, просмотрено 2 338 173 материала (статистика на март 2024 г.). Из этого можно сделать вывод, что разработка и использование многофункционального специализированного ресурса для слабовидящих является актуальной задачей.

С другой стороны, разработка и внедрение такого ресурса предполагает и функционал для сотрудников библиотеки. Например, реализацию системы регистрации и авторизации с разграничением прав пользователей, создание базы данных читателей, книг и сотрудников, реализацию поисковой системы для статистического анализа и многое другое.

Также важным аспектом, облегчающим слабовидящим читателям посещение специализированных библиотек, является их регистрация в автоматизированной системе, дальнейшее посещение заведения по штрихкоду, общение с голосовым помощником, который по *ID* находит читателя, выдает информацию о книгах, имеющихся у него на руках, анализирует статистику по прочитанным книгам и выдает различного рода рекомендации.

В первую очередь следует отметить, что в большинстве библиотек для слабовидящих людей на территории нашей страны используется пакет программ ирбис [5]. Данная система, с одной стороны, многофункциональна, что приводит к определенной степени избыточности для конкретных библиотечных организаций, а с другой стороны, не достаточна универсальна и не решает круг поставленных перед конкретной специализированной библиотекой задач. Все, что будет описано ниже, касается областной специальной библиотеки для слепых им. Н. Островского в городе Калуге. Проанализировав записи для данной библиотеки, написанные на специализированном для системы ирбис языке форматирования *CDS/ISIS*, можно отметить, что более 30-ти % полей записей не используется (рис. 1).

Название элемента	№	Значение
10: Фамилия		
11: Имя		
12: Отчество		
21: Год рождения		
30: Идентификатор читателя		
23: Пол		
50: Категория	1	
22: Номер пропуска		
17: Телефон домашний		
18: Телефон служебный	1	
32: E-mail	1	
51: Дата записи	1	
52: Дата перерегистрации	1	не используется
56: Разрешенные места получения лит-ры	1	не используется
57: Неразрешенные места получения лит-ры	1	не используется
29: Право пользования библиотекой		не используется

Элемент: "50: Категория"		
Значение	Пояснения	
<input checked="" type="checkbox"/> Зрячий		
<input checked="" type="checkbox"/> Незрячий		
<input checked="" type="checkbox"/> Слабовидящий		
<input type="checkbox"/> Инв. др категорий		
<input type="checkbox"/> Тифлопедагог		
<input type="checkbox"/> Школьник		
<input type="checkbox"/> Студент		
<input checked="" type="checkbox"/> Дети		
<input type="checkbox"/> Родители незрячих детей		
<input type="checkbox"/> Пенсионер		
<input type="checkbox"/> Работающий		

Название элемента	№	Значение
14: Паспортные данные		
13: Домашний адрес		
34: Прописан до		
15: Место работы		
16: Должность		
19: Место учебы		
20: Образование		
28: Ученая степень, звание		не используется
33: Примечание		не используется
950: Фотография читателя (файл)		не используется
953: Внутренний двоичный ресурс (фотографи	1	не используется
112: IP-адрес удаленного пользователя	1	не используется

Рис. 1. Примеры не используемых записей  
Fig. 1. Examples of unused records

Помимо всего прочего, для работы с библиотечной системой ирбис необходим специалист, разбирающийся в структуре и синтаксисе языка форматирования системы. Однако не все библиотечные структуры могут финансово позволить иметь в своем штате такого сотрудника. Поэтому первым этапом в разработке специализированной библиотечной системы являлся перенос данных из системы ирбис в новую базу данных. Для этого необходимо было написать синтаксический анализатор (парсер), который чистит файл от форматов команд системы ирбис и предоставляет информацию о читателях в «чистом виде» для дальнейшей обработки и работы с ней в новой системе.

Синтаксический анализ текста является начальным этапом разработки специализированного программного обеспечения.

Далее нужно перейти к реализации следующих шагов. Создается скелет базы данных (заполнение таблиц, выполнение и обработка запросов). База данных состоит из 2 связанных таблиц: читатель и книга. Таблица «читатель» имеет следующие поля: фамилия, имя, отчество, год рождения, пол, работа, дата регистрации, место проживания, паспорт, образование, категория, дата выдачи, возврат, книга. Таблица «книга» имеет следующие поля: название, автор, издательство, дата выпуска, шрифт Брайля, флэш, на руках, читатель.

База данных создана с помощью системы *SQL Server*. Каждый читатель имеет читательский билет, на который наносится специальный штрих-код. Штрих-код формируется в соответствии с *ID* читателя. Для его считывания на каждом рабочем месте установлен специальный сканер. Сканер считывает штрих код и вставляет его числовое представление в соответствующее поле формы интерфейсного модуля. После того как кнопка «ввод» была активирована, система открывает необходимую читателю вкладку работы с приложением. *ID* пользователя библиотеки для слабовидящих используется и в модуле «голосовой помощник».

Следует отметить, что всех пользователей библиотеки можно разделить на «незрячих», «слабовидящих» и «видящих». В зависимости от информации, считанной сканером штрих-кода, для читателей доступны разные возможности. Например, для незрячих система автоматически сортирует книги, написанные шрифтом Брайля или записанные в аудио формате, и только их предоставляет данной категории читателей. Также возможен поиск по автору, году издания и типу; возможно бронирование выбранного источника знаний. Для других категорий возможностей работы с литературой у читателя больше.

У читателя есть личный кабинет, в котором отображается информация о прочитанных книгах, информация о книгах «на руках» и срок их сдачи. В библиотеке существует возможность продления книги, которая находится на руках у читателя. Для этого в личном кабинете имеется кнопка «продлить», при ее нажатии срок возврата книги увеличивается на 2 недели от текущего срока.

Для работы с читателями в процессе книговыдачи в разработанном приложении предусмотрена система администрирования. Администратор может добавить нового читателя, удалить читателя и изменить поля уже имеющегося в базе данных читателя. Такие же действия он может провести и с книгами (рис. 2).

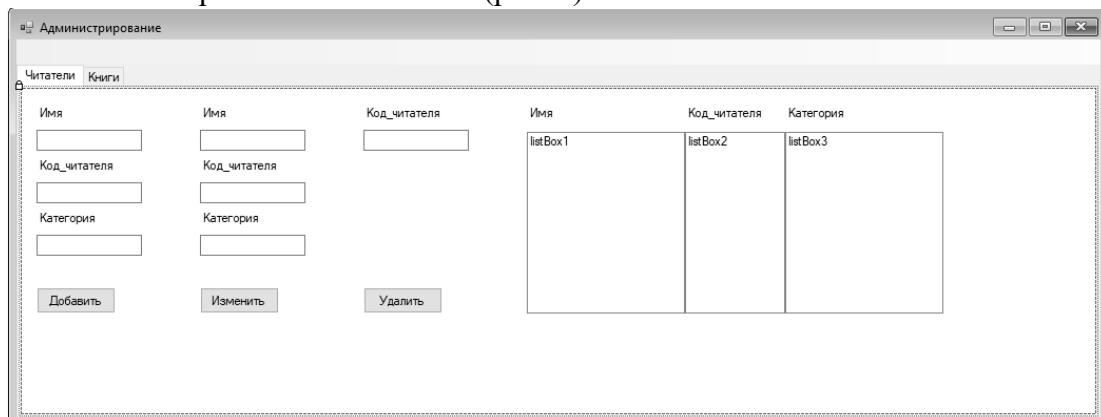


Рис. 2. Интерфейс панели администрирования  
Fig. 2. Administration Panel interface

В процессе тестирования и использования первого варианта специализированной библиотечной системы в вопросе автоматизации книговыдачи было выявлено, что переключение между полями формы для слабовидящих читателей с помощью клавиши табуляции доставляет дискомфорт. Читатели могут пропустить определенные поля, и тогда процесс по-

иска книги затягивается, теряется самостоятельность слабовидящего читателя в подборе требуемой ему книги. Поэтому было принято решение о реализации в данной системе голосового помощника.

При этом использовалась технология *NLP* (обработка естественного языка) – одно из направлений работы искусственного интеллекта. Программа использует сложные алгоритмы, большие объёмы данных. Ниже представлены некоторые задачи *Natural Language Processing*.

1. Распознавание именованных сущностей – определение и классификация имён собственных в тексте, например, фамилии, имена и отчества людей.
2. Разрешение семантической неоднозначности – определение правильного значения слова в определённом контексте. Например, слова «месяц» в календаре и на небе.
3. Анализ синтаксической структуры предложения – определение подлежащего, сказуемого, второстепенных членов.
4. Распознавание языка, на котором написан текст, перевод с одного языка на другой.
5. Идентификация ссылок на одну и ту же сущность в тексте. Например, фраз «вывести всех читателей» и «все читатели», относящихся к одному и тому же человеку.
6. Генерация – создание нового текста на основе полученных данных.

При разработке голосового помощника необходимо определиться с моделью машинного обучения. Это влияет на точность перевода человеческой речи в цифровые данные, на объём обрабатываемой информации.

На практике используются 4 наиболее популярных метода для перевода текстов в числовые форматы: прямое кодирование (*one-hot encoding*), «мешок слов» (*bag of words*), *TF-IDF* (от англ. *TF – term frequency, IDF – inverse document frequency*), векторное представление слов (*word embeddings*). В предлагаемой разработке использовался последний метод. Векторное представление слов – это ввод числового вектора, который представляет слово. Он используется в качестве входных данных для моделей машинного обучения, визуализируя закономерности использования при обучении. При этом улавливается контекст слов, очевидно более быстрое создание и обновление моделей обучения нейронной сети.

Пример текущего словаря команд для голосового помощника показан на рис. 3.

```
opts = {
    "alias": ('помощник', 'помоги', 'голосовой ввод'),
    "cmds": {
        "ctime": ('текущее время', 'который час'),
        "add": ('добавить читателя', 'добавить в базу данных', "добавить", 'добавить в бд'),
        "show": ('вывести', 'все читатели', 'вывести всех читателей', 'вывести всех')
    }
}
```

Рис. 3. Пример словаря команд для голосового помощника  
Fig. 3. An example of a command dictionary for a voice assistant

В рассматриваемой в статье разработке при запуске голосовой помощник приветствует пользователя, после чего необходимо подождать несколько секунд, пока обрабатывается шум окружающей среды (рис. 4). После команды «говорите», помощник готов к работе.

```
Здравствуйте
Говорите
[log] Распознано: текущее время
Сейчас 16:23
```

Рис. 4. Один из результатов работы голосового помощника  
Fig. 4. One of the results of the voice assistant

Далее представлено несколько мультимедийно направленных модулей, разработанных для читателей библиотеки.

Для начала рассмотрим модуль новостного блока с реализацией функции озвучивания новостей. Информация является главной ценностью современного мира. Чтобы поддерживать её на своём ресурсе в актуальном состоянии необходимо тратить немало усилий и времени. Для того, чтобы сократить временные затраты и автоматизировать всё, связанное с обновлением новостей (поиск нового материала, его экспорт в необходимом формате), существует процедура, называемая парсингом. Для начала необходимо подготовить базу, т.е. место, откуда читатели будут переходить на интересующие их новости. Кроме того, желатель-

но добавить различные тематики, разделы, чтобы заинтересовать всех пользователей, и они могли выбирать то, что им по вкусу.

Выделим 5 тематик, в каждой из которых будут соответствующие им новости: новости России, Калужские новости, новости спорта, литературные новости и новости в музыке (рис. 5).

На службе у незрячего читателя

Rusty\_Kat - 30.05.2021 - Новость - 0 комментариев

Более 10 лет на базе Калужской специальной библиотеки для слепых успешно функционирует реабилитационно-досуговый клуб «Преодоление», в рамках которого читатели-инвалиды знакомятся с тифлотехническими средствами и новыми IT-технологиями, позволяющими адаптироваться в социуме и...

Продолжить чтение >

Почетный гражданин города Калуги Юрий Алексеевич Гагарин

Rusty\_Kat - 14.04.2021 - Новость - 1 комментарий

Юрий Алексеевич Гагарин является почетным гражданином города Калуги. Это звание ему было присвоено 5 мая 1961 года. Гагарин прилетел в Калугу с официальным визитом 13 июня 1961 года. Самолёт с...

Продолжить чтение >

АКТУАЛЬНЫЕ НОВОСТИ

Новости России

Калужские новости

Новости спорта

Литературные новости

Новости в музыке

Рис. 5. Раздел актуальных новостей  
Fig. 5. Current news section

Для того чтобы не загружать читателей потоком данных и им было удобно оперировать информацией, в каждом разделе отображается небольшое количество статей, например, десять, а само их отображение упрощено до заглавия статьи. Эти заглавия являются ссылками на источник статьи (рис. 6).

Новости России

Новости России > Новости России

АКТУАЛЬНЫЕ НОВОСТИ

Новости России

Калужские новости

Новости спорта

Литературные новости

Новости в музыке

- Умер самый эффективный сенатор-республиканец в США
- Первые космические туристы задерживаются на МКС из-за погоды
- Госдеп отказался комментировать заявление Зеленского
- Российская делегация получила Благодатный огонь
- Citroen откажется от выпуска минивэнов
- Украинский дрон сбросил на российских военнослужащих ампулы с химией
- Рогозин: "Сармат" примут на вооружение уже осенью
- "Прогресс МС-18" уведет МКС от столкновения с космическим мусором
- Последствия вакцинации или новый вирус? Детей в Европе и США поражает гепатит
- Эксперт: на Украине ложь возведена в фантастический культ

Рис. 6. Вид отображаемых новостей  
Fig. 6. View of the displayed news

Кроме того, переходя на все информационные разделы, остается возможность изменения своего решения посредством выбора другого раздела из правого меню. Также реализована функция прослушивания полученной информации (рис. 7).

Около выделенного текста появляется иконка динамика, наведя на которую, появляется текст: «Нажмите, чтобы прослушать!». Нажав, происходит проговаривание текста.

Также реализован графический редактор для слабовидящих людей, созданный в рамках мультимедийного контента.

Он позволяет создавать изображения на основе шаблонов, чтобы было удобнее рисовать, или же рисовать произвольно. Из настроек возможна смена цвета линии и изменение её толщины.

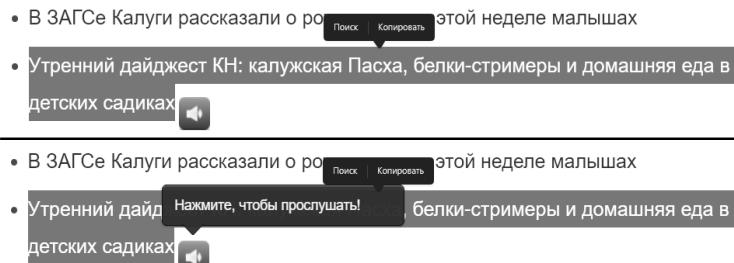


Рис. 7. Озвучивание  
Fig. 7. Voicing

Создана иконка-подсказка, которая, при наведении на неё курсора, выдает информацию для читателя о дополнительных возможностях графического редактора: при нажатии на клавишу «*Del*» – очищается область рисования, а при нажатии на «*Space*» (пробел) временно убирается фон-шаблон, чтобы можно было получить только нарисованное изображение. В редакторе реализован выбор цвета, выбор толщины линии. Реализованы настройки канвы для рисования и стилизация кнопок.

На рис. 8 приведен код функции выбора шаблона.

```
function img_5() {
    document.getElementById("sketch").src =
    "img/sketch5.jpg";
    if (document.getElementById("main").style.visibility
    == "hidden") document.getElementById("main").style.
    visibility = "visible";
    else document.getElementById("main").style.visibility
    = "hidden";
}
```

Рис. 8. Функция выбора шаблонов  
Fig. 8. Template selection function

Тестирование данного графического редактора пользователями библиотеки для слабовидящих показало его работоспособность. В данный момент реализуются функции добавления сложной заливки (градиент, заливка узором), расширяется количество шаблонов.

## Заключение

Наполнение мультимедийного контента для проведения досуга пользователями библиотеки постоянно пополняется. Реализована виртуальная экскурсия по библиотеке, появился новостной блок, который регулярно обновляется.

Таким образом, выше была представлена часть функционала специализированной библиотечной системы для слабовидящих людей. Система направлена на автоматизацию ряда действий для сотрудников библиотеки и на облегчение использования предоставляемых библиотекой услуг для слабовидящих людей. В настоящее время представленная к рассмотрению специализированная библиотечная система для слабовидящих внедрена в областной специальной библиотеке для слепых им. Н. Островского в г. Калуге и проходит постоянное тестирование и модернизацию.

### Список источников:

1. <https://www.kommersant.ru/doc/5693041>.
2. <https://www.rusblind.ru> – информационный портал специальных библиотек.
3. Алешина В.В. К вопросу о библиотечном обслуживании в РФ лиц, полностью или частично утративших зрение //Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. – 2011. – №5-2. – С. 8-11.
4. Алексеев В.В., Дубровина О.В. Моделирование адаптации электронных информационных ресурсов для слабовидящих и незрячих пользователей // Правовая информатика. – 2021. – №3. – С. 68-76.
5. <https://kkbs-kuban.narod.ru/DOCS/Sites-for-blind.pdf>.

### References:

1. Kommersant.ru [Internet]. Available from: <https://www.kommersant.ru/doc/5693041>
2. Rusblind.ru – Informational Portal of Special Libraries [Internet]. Available from: <https://www.rusblind.ru>
3. Aleshina V.V. On the Issue of Library Services in the Russian Federation for Persons Who Have Completely or Partially Lost Their Vision. Intellectual Potential of the 21st Century: Steps of Knowledge. 2011;5-2:8-11.
4. Alekseev V.V., Dubrovin O.V. Electronic Information Resources Adaptation Modelling for Visually Impaired and Blind Users. Legal Informatics. 2021;3:68-76.
5. Sites For Blind [Internet]. Available from: <https://kkbs-kuban.narod.ru/DOCS/Sites-for-blind.pdf>

6. Борсук Н.А., Дерюгина Е.О., Гартман В.А. Создание специализированной информационной системы для ведения отчетности в библиотеках для слабовидящих людей. Состояние и перспективы социально-экономического развития России: сборник научных статей по материалам региональной НПК. Издательство АКФ «Политоп». – 2019. – С. 203-207.

7. Каримов А.Ю. Анализ алгоритмов голосовых помощников // Вестник науки. – 2019. – №5 (14). – Т.4. – С. 492-495.

8. Цитульский А.М., Иванников А.В., Рогов И.С. NLP. Обработка естественных языков // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2020. – №6. – С. 467-474.

9. <https://www.mtt.ru/support/blog/nlu-natural-language-understanding-i-nlp-natural-language-processing-cto-eto-takoe-i-kak-s-etim-rab/nlp>.

10. Документационное обеспечение управления библиотечно-информационной деятельностью: учебное пособие для бакалавров / авт.-сост. А. С. Румянцева; Министерство культуры Российской Федерации, Орловский государственный институт искусств и культуры. – Орел: Орловский государственный институт искусств и культуры, 2015. – 180 с.

11. Проектирование автоматизированных библиотечно-информационных систем: учебник для студентов направления подготовки «Библиотечно-информационная деятельность» / Н.И. Колкова, И.Л. Скипор; отв. ред. сер. И.Л. Скипор; Кемеровский государственный институт культуры. – Кемерово: Кемеровский государственный институт культуры (КемГИК), 2020. – 382 с.

12. Современные технологии разработки веб-приложений: учебное пособие / Д.В. Вагин, Р.В. Петров / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2019. – 52 с.

13. Сакулин С.А. Основы интернет-технологий: HTML, CSS, JavaScript, XML: учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 112 с.

14. Яковлева С. Что такое парсер и как с ним работать [Электронный ресурс] / URL: <https://romi.center/ru/learning/article/what-is-data-parsing>.

#### Информация об авторах:

**Онуфриева Татьяна Александровна**  
кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информационные системы и сети», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 724127

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

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

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

**Статья поступила в редакцию 12.07.2024; одобрена после рецензирования 26.07.2024; принята к публикации 19.05.2025.**

**The article was submitted 12.07.2024; approved after reviewing 26.07.2024; accepted for publication 19.05.2025.**

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

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

6. Borsuk NA, Deryugina EO, Gartman VA. Creation of a Specialized Information System for Reporting in Libraries for Visually Impaired People. In: Proceedings of the Regional Research Conference on Current State and Prospects of Social and Economic Development of Russia. Kaluga: Politop: 2019. p. 203-207.

7. Karimov A.Yu. Analysis of Speech Recognition Algorithms. Science Bulletin. 2019;5(14)-4:492-495.

8. Tsytulsky A.M., Ivannikov A.V., Rogov I.S. NLP. Natural Language Processing. StudNet Educational Journal for Students and Teachers. 2020;6:467-474.

9. Blog Post: NLU (Natural Language Understanding) and NLP (Natural Language Processing): What They Are and How to Use Them [Internet]. Available from: <https://www.mtt.ru/support/blog/nlu-natural-language-understanding-and-nlp-natural-language-processing-what-it-is-and-how-to-work-with-it-nlp>

10. Rumyantseva AS, compiler. Document Support for Library and Information Activities. Orel: Orel State Institute of Arts and Culture; 2015.

11. Kolkova N.I, Skipor I.L. Designing Automated Library and Information Systems. Kemerovo: Kemerovo State Institute of Culture; 2020.

12. Vagin D.V., Petrov R.V. Modern Technologies for Web Application Development. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2019.

13. Sakulin S.A. Fundamentals of Internet Technology: HTML, CSS, JavaScript, XML. Bauman Moscow State Technical University; 2017.

14. Yakovleva S. What Is a Parser and How to Use It [Internet]. Available from: <https://romi.center/ru/learning/article/what-is-data-parsing>

#### Information about the authors:

**Onufrieva Tatyana Alexandrovna**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Networks of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Author ID: 724127

**Borsuk Natalia Alexandrovna**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Networks of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 001.51

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-91-96

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА МЕТОДА ОБРАБОТКИ И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

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.** Цель исследования заключается в разработке функциональной модели автоматизированной системы выбора метода обработки и режущего инструмента. Данная система необходима для повышения качества и скорости разработки технологических процессов механической обработки деталей и снижения себестоимости производства при сохранении высокого качества продукции. Задача исследования состоит в проведении функционального моделирования, выполняемого на начальном этапе разработки автоматизированной системы, для определения иерархической структуры разрабатываемой автоматизированной системы и выявления внутренних взаимосвязей. При исследовании была использована методология структурного анализа, позволяющая рассматривать систему на разных уровнях абстрагирования. В рамках структурного анализа была применена технология функционального моделирования IDEF0. Новизна работы заключается в том, что в основе функциональной модели была использована классификация припуска, которая позволяет установить взаимосвязь между параметрами припуска, методами обработки и режущим инструментом. При разработке модели определены основные модули автоматизированной системы, точки интеграции с другими автоматизированными системами управления предприятия, входные и выходные данные. Результаты исследования могут быть использованы при разработке автоматизированных систем технологической подготовки производства. Дальнейшее развитие работы связано с разработкой алгоритмов реализации основных функций и создания баз данных припусков, методов обработки и режущего инструмента. Выводы. Построенная функциональная модель процессов в нотации IDEF0 позволила выявить управляющие воздействия и механизмы реализации процесса автоматизированного выбора методов обработки и режущего инструмента. Отображены взаимосвязи между процессами одного уровня. Определены потоки данных и логика выполнения процессов системы.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, методы механической обработки, технологическая подготовка производства, функциональное моделирование

**Для цитирования:** Юдин Д.В., Феофанов А.Н. Моделирование функционального состава автоматизированной системы выбора метода обработки и режущего инструмента // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 91-96. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-91-96.

Original article

Open Access Article

## MODELLING FUNCTIONAL COMPOSITION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR SELECTING MACHINING METHOD AND CUTTING TOOL

Denis V. Yudin<sup>1✉</sup>, Aleksander 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 aim of the study is to develop a functional model of an automated system for selecting a machining method and cutting tool. This system is necessary to improve the quality and speed of developing technological processes for machining parts and reducing production costs while maintaining high product quality. The objective of the study is to conduct functional modelling at the initial stage of developing an automated system to determine the hierarchical structure of the developed automated system and to identify internal relationships. The study uses the methodology of structural analysis, which allows considering the system at different abstraction levels. Within the framework of the structural analysis, the authors apply the IDEF0 functional modelling technology. The novelty of the work lies in basing the functional model on the allowance classification, which allows establishing the relationship between the parameters of the allowance, machining methods and the cutting tool. In developing the model, the authors determine the main modules of the automated system, integration points with the enterprise's other automated control systems, input and output data. The results of the study can be applied in developing automated systems for technological preparation of production. Further development of the work entails designing implementation algorithms for core functions and establishing databases for allowances, machining methods, and cutting tools. Conclusion states that the constructed functional model in IDEF0 notation allows identifying controlling influences and mechanisms for implementing the process of automatic choosing of machining methods and cutting tools. The paper displays interdependencies between the processes at one

level, determines data flows and logic for executing the system processes.

**Keywords:** automated system, machining methods, production engineering preparation, functional modelling

**For citation:** Yudin D.V., Feofanov A.N. Modelling Functional Composition of an Automated System for Selecting Machining Method and Cutting Tool. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 91-96. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-91-96.

## Введение

В данной работе представлена функциональная модель процесса выбора в автоматизированном режиме методов обработки (МО) и режущего инструмента (РИ) в соответствии с параметрами удаляемого припуска. Функциональное моделирование является начальным этапом разработки автоматизированных систем (АС), т.к. оно позволяет определить иерархическую структуру, выявить взаимосвязи этапов подбора МО и РИ и определить управляющие воздействия и механизмы реализации автоматизируемого процесса.

Алгоритм подбора МО и РИ основывается на формализации припуска и его классификации, которая предоставляет возможность автоматизации разработки технологического процесса (ТП), а также унификации ТП, РИ, оборудования и технологического оснащения, применяемого при производстве [1].

## Материалы, модели, эксперименты и методы

В данной работе использована методология структурного анализа. Методология основывается на применении отношения «целое-часть», что позволяет рассматривать систему на разных уровнях абстрагирования. На данном этапе анализируется не проблема, т.е. не причины ее возникновения или способы ее решения, а сама проблеморешающая система. Декомпозиция системы позволяет подробно рассмотреть, как она устроена, из чего состоит, как работает.

Методология структурного анализа использует функциональную декомпозицию. Система и ее подсистемы при этом рассматриваются как процессы, осуществляющие некоторые преобразования. Формируемое дерево процессов представляет собой модель функционального состава системы, т.к. выделение той или иной подсистемы осуществляется в соответствии с тем, какую функцию она должна выполнять, что она должна делать. То, как, каким образом, с помощью каких ресурсов подсистема выполняет свою функцию представляется в виде структурированного описания [2].

В рамках структурного анализа широкое применение получила методология моделирования из семейства *ICAM* (*Integrated Computer-Aided Manufacturing*).

*IDEF* – это технология функционального моделирования, разработанная в 1981 году американским департаментом военно-воздушных сил. Она используется для описания и анализа бизнес-процессов и систем. Основными аспектами и особенностями *IDEF0* являются:

– иерархическое моделирование. *IDEF0* позволяет создавать иерархические модели, где каждый уровень детализации представляет собой более детальное описание процессов;

– графическое представление. Модели *IDEF0* представляют собой графические диаграммы, которые показывают структуру и взаимосвязь бизнес-процессов одного уровня абстракции. Эти диаграммы состоят из блоков, представляющих функции, и стрелок, обозначающих входы, выходы, механизмы и управления;

– функциональные блоки. Каждый блок на диаграмме *IDEF0* представляет собой отдельную функцию или процесс. Блоки связаны между собой стрелками, которые показывают, как информация или материалы перемещаются между функциями.

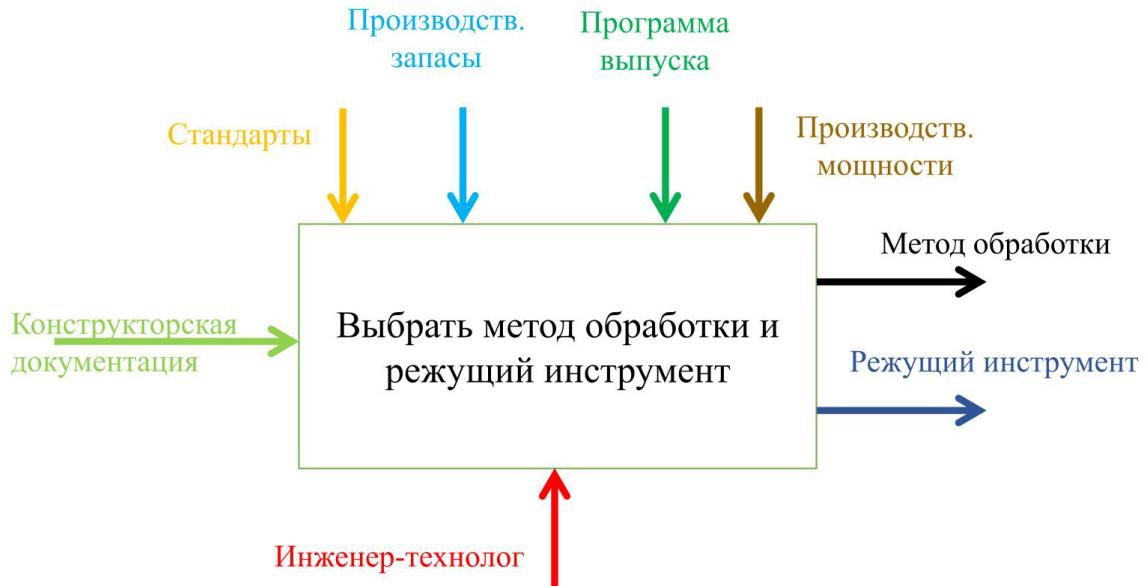
В методологии *IDEF0* используются четыре группы элементов, составляющих интерфейс функциональных блоков – вход, выход, механизм и управление [3].

В модели *IDEF0* между функциональными блоками показывают необходимые для его деятельности взаимосвязи. Степень детальности их описаний возрастает при переходе от верхних уровней к нижним. Таким образом происходит декомпозиция не только подсистем, но и связей.

Основным преимуществом методологий структурного анализа является наглядность представления структуры существующей, либо проектируемой системы. Основным недостатком – отсутствие средств отражения причинно-следственных связей между проблемой и средствами ее разрешения [4].

## Результаты

Построение модели начинается с диаграммы верхнего уровня называемой контекстной диаграммой. Данная диаграмма состоит из единственного блока, отображающего систему в целом и дуги, связывающие систему с внешним окружением, а также содержит описание цели моделирования и точки зрения, с которой разрабатывается модель. Контекстная диаграмма системы выбора МО и РИ представлена на рис. 1.



Цель: повышение эффективности выбора метода обработки и режущего инструмента  
Точка зрения: служба технологической подготовки предприятия

Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса разработки ТП  
Fig. 1. Context diagram of the technology development process

Схема показывает, что управляющее воздействие на этап выбора метода обработки и режущего инструмента оказывают не только параметры изготавливаемых изделий, но и данные поступающие из систем материального обеспечения и управления производством.

Проведена декомпозиция контекстной диаграммы для визуализации последовательности действий при выборе МО и РИ. Декомпозиция позволяет визуализировать принцип работы системы, опишет входы и выходы каждой функции и определит управляющие воздействия. Функциональная модель АС МО и РИ представлена на рис. 2.



Рис. 2. Функциональная модель АС МО и РИ  
Fig. 2. Functional model of the automated system

Анализ функциональной модели АС МО и РИ показывает:

- существуют три основные функции АС, требующие алгоритмизации;
- точки интеграции АС с другими автоматизированными системами управления предприятия;
- входных и выходных данных для АС;
- необходимость разработки базы данных припусков, МО и РИ.

На рис. 3 – 5 представлена декомпозиция основных функций АС МО и РИ. Они представляют собой диаграммы нижнего уровня проектируемой АС

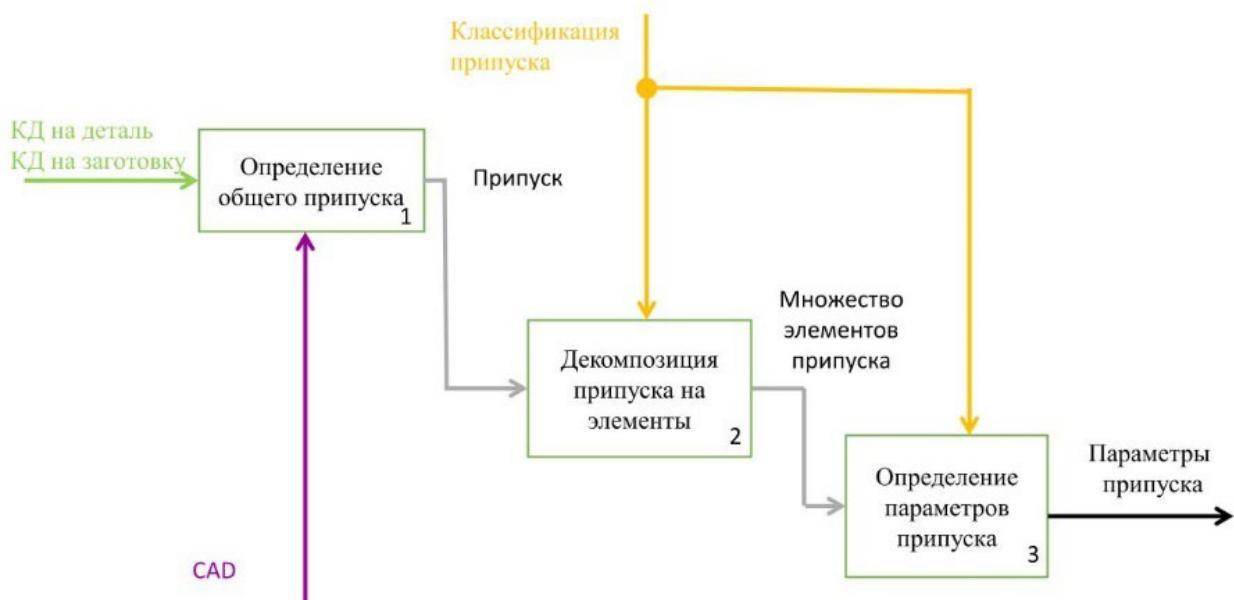


Рис. 3. Модель функции параметризации припуска  
Fig. 3. Model of the allowance parameterisation function

На этапе 1 на основе 3D моделей детали и заготовки определяется общий припуск на деталь. Далее, на этапе 2, общий припуск декомпозируется на множество элементов, в соответствии с разработанной классификацией припуска. На этапе 3 каждому из элементов присваивается набор параметров однозначно его определяющих.

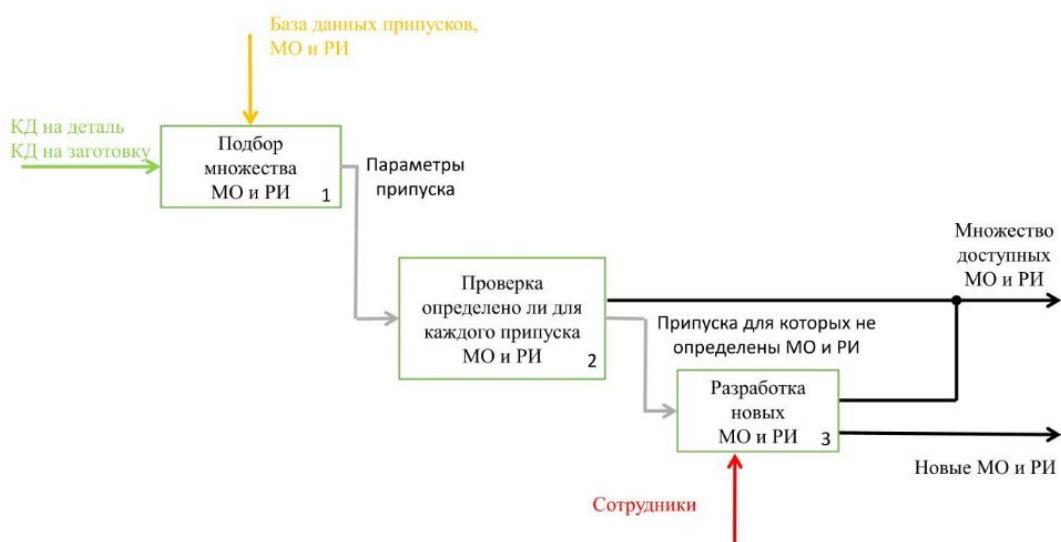


Рис. 4. Модель функции выбора множества МО и РИ  
Fig. 4. Model of the selection function

Функция выбора множества МО и РИ выполняется за 3 этапа. На первом этапе, в соответствии с присвоенным каждому элементу множеству параметров выбирается множество

подходящих МО и РИ. Результатом данного этапа могут быть следующие случаи: элементу припуска подобран один МО и РИ, больше одного или нет подходящих вариантов. На втором этапе происходит отбор элементов припуска, для которых не существует подходящих МО и РИ, с последующей передачей их на третий этап. На данном этапе происходит разработка новых подходящих МО и РИ, ранее не включенных в заводскую базу данных

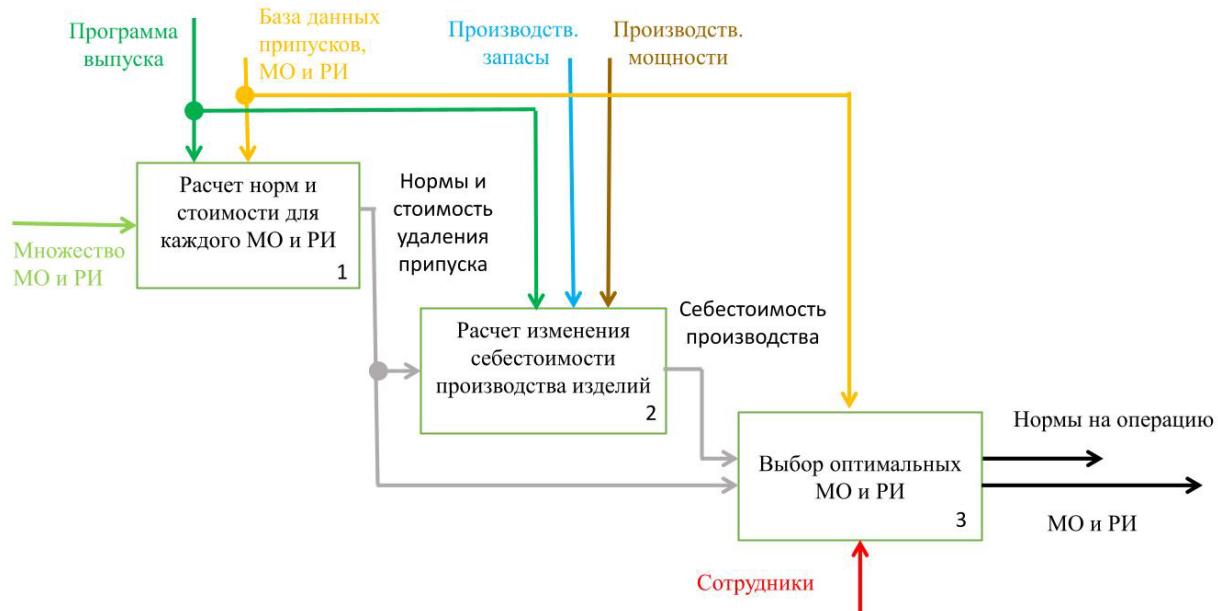


Рис. 5. Модель функции оптимизации выбора МО и РИ  
Fig. 5. The model of the selection optimisation function

Функция оптимизации решает задачу по выбору МО и РИ из доступного множества вариантов, с целью формирования оптимального ТП. Под оптимальным ТП понимается процесс, при котором выбранная целевая функция принимает экстремальное значение. В качестве критерия оптимальности предполагается снижение себестоимости изготовления изделий. Для реализации данной функции на первом этапе происходит расчет стоимости каждого МО. На втором этапе происходит комплексная оценка влияния выбора конкретных МО и РИ на общую себестоимость производства. На третьем этапе на основе критериев оптимальности происходит выбор оптимального варианта.

## Заключение

Полученная функциональная модель будет использована при разработке автоматизированной системы выбора методов обработки и режущего инструмента. В основе построения модели была использована взаимосвязь между параметрами припуска, методами обработки и режущим инструментом.

В модели показаны три основные функции АС: параметризация припуска, выбор допустимых МО и РИ, оптимизация выбора. Указанные функции необходимо математически formalизовать для реализации алгоритма функционирования системы. В работе выполнена декомпозиция функций АС и описаны этапы их реализации. Определены точки интеграции с другими автоматизированными системами управления предприятия, входные и выходные данные необходимые для функционирования системы.

## Список источников:

1. Д.В. Юдин, А.Н. Феофанов Формализация припуска, удаляемого при обработке резанием, для решения задачи автоматизации разработки технологического процесса // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – №3 (25).

## References:

1. Yuodin D.V., Feofanov A.N. Formalizing the Allowance Removed During Cutting to Solve the Problem of Automating the Technological Process Development. Automation and Modelling in Design and Management. 2024;3(25).

2. Силич В.А., Силич М.П. Теория систем и системный анализ: учебное пособие. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 276 с.

3. Методология IDEF0. Стандарт. Русская версия. – М.: Метатехнология, 1993. – 107 с.

4. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Изд-во Юрайт, 2025. – 562с.

2. Silich V.A., Silich M.P. Theory of Systems and System Analysis. Tomsk: Publishing House of National Research Tomsk Polytechnic University; 2011.

3. IDEF0 Methodology. Standard. Russian Version. Moscow: Metatechnology; 1993.

4. Volkova V.N., Denisov A.A. Theory of Systems and System Analysis. 3rd ed. Moscow: Publishing URAIT; 2025.

### Информация об авторах:

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

**Феофанов Александр Николаевич**  
Доктор технических наук, профессор кафедры инженерной графики 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 Aleksander 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, of Qualimetry Division 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 18.04.2025; одобрена после рецензирования 30.04.2025; принята к публикации 15.05.2025.**

**The article was submitted 18.04.2025; approved after reviewing 30.04.2025; accepted for publication 15.05.2025.**

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

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

---

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) 56-02-61. E-mail: aim-pu@mail.ru

*Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Петраченкова.*

Сдано в набор 16.06.2025. Выход в свет 30.06.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,16.

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

