

---

ISSN 2072-3172  
DOI 10.4761/2072-3172

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный технологический  
университет «СТАНКИН»

# **ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»**

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (59), октябрь-декабрь 2021

*Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук»*

# ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

№ 4 (59), 2021

Научный рецензируемый журнал  
Журнал основан в 2008 году

---

## Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере  
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-31574 от 4 апреля 2008 г.

---

**Председатель Редакционного Совета,**  
и.о. Ректора ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
**В.В. Серебрянный**

**Главный редактор**  
**Ю.В. Подураев**, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

**Научный редактор**  
**Ю.В. Илюхин**, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

---

## Редакционный совет

- Бьянки Джакомо** д-р техн. наук, глава департамента Института промышленных технологий и автоматизации ITIA-CNP (Италия)
- Вегенер Конрад** д-р техн. наук, проф., Руководитель института машиностроения и технологии, ETN Цюрих (Швейцария)
- Гречишников Владимир Андреевич** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Дмитриев Александр Михайлович** чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Еленева Юлия Яковлевна** д-р экон. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Заборовский Тадеуш** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления и информационных систем Познаньский технологического университета (г. Познань, Польша)
- Илюхин Юрий Владимирович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Каталинич Бранко** д-р техн. наук, проф., Венский университет технологий (Австрия)
- Клейнер Георгий Борисович** чл.-кор. РАН, д-р экон. наук, зам. директора ЦЭМИ РАН, РФ
- Корриат Ханс Иоахим** д-р техн. наук, глава департамента Института производственного управления и автоматизации им. Фраунхофера (Германия)
- Кутин Андрей Анатольевич** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Мartiнов Георги Маринов** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Подураев Юрий Викторович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Позднеев Борис Михайлович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Стебулянин Михаил Михайлович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Такаш Янош** д-р техн. наук, проф., Будапештский университет технологии и экономики (Венгрия)
- Телешевский Владимир Ильич** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ
- Торресильяс Рамон** д-р техн. наук, проф., директор Центра исследований наноматериалов и нанотехнологий (Испания)
- Уварова Людмила Александровна** д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, РФ

---

© ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2021

# VESTNIK MSUT «Stankin»

№ 4 (59), 2021

Scientific peer-reviewed journal

The magazine was founded in 2008

---

## Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology  
«STANKIN» (MSUT «STANKIN»)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Compliance with Legislation in the Field of Mass  
Communications and Protection of Cultural Heritage, certificate PI No. FS77231574 of April 4, 2008.

---

## Chairman of editorial board

Acting Rector of MSUT «STANKIN»

**V.V. Serebrenniy**

## Editor-in-Chief

**Yu.V. Poduraev**, Doctor of Technical Sciences, Professor

## Scientific editor

**Yu.V. Ilyukhin**, Doctor of Technical Sciences, Professor

---

## Editorial Board of «Vestnik MSUT «Stankin» Journal

- Giacomo Bianchi** Doctor of Science, Head of department «Dynamic Analysis Simulation of Machinery» of ITIA-CNR (Italy)
- Konrad Wegener** Doctor of Science, Professor, Head of Inst, Machine Tools Manufacturing, Full Professor at the Department of Mechanical and Process Engineering ETH Zurich (Switzerland)
- Vladimir A. Grechishnikov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Aleksander M. Dmitriev** Doctor of Science, Professor, Corresponding Member of the RAS, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Yulia Y. Eleneva** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Tadeush Zaborovski** Doctor of Science, Professor, Poznan University of Technology (Poland)
- Yury V. Ilyukhin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Branko Katalinic** Doctor of Science, Professor, Vienna University of Technology (Austria)
- Georgiy B. Kleyner** Doctor of Science, Corresponding Member of the RAS, Vice2director of the Central Economic and Mathematical Institute of the RAS (Russia)
- Hans-Joachim Koriath** Doctor of Science, Head of department «Machine Tools & Automation» of Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology
- Andrey A. Kutin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Georgi Martinov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Yuriy V. Poduraev** Doctor of Science, Professor, Editor-in-Chief, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Boris M. Pozdneev** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Michail M. Stebulyanin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Janos Takacs** Doctor of Science, Professor, Budapest University of Technology and Economics (Hungary)
- Vladimir I. Teleshevskiy** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Ramon Torrecillas** Doctor of Science, Professor, Director of the Nanomaterials and Nanotechnology Research Center (CINN) of the Spanish Council for Scientific Research (CSIC) (Spain)
- Lyudmila A. Uvarova** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN» (Russia)
-

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

<b>Мартинова Л.И., Цай С.Ю.</b> Разработка постоянных циклов токарной обработки .....	8
<b>Деркач Е.В., Нежметдинов Р.А.</b> Разработка методики и алгоритмов стендового тестирования систем логического управления.....	13
<b>Нежметдинов Р.А., Меликов П.И., Ковалев И.А., Соколов С.В.</b> Разработка установки трехмерной печати для пищевой промышленности .....	19
<b>Махов А.А.</b> Повышение качества учебных и любительских проектов на базе Arduino с помощью технологий трехмерного моделирования .....	25
<b>Шварцбург Л.Э., Иванова Н.А., Рябов С.А., Кулизаде Д.И.</b> Энергетический анализ и экологичность технологических процессов механообработки .....	30
<b>Денисов М.С.</b> Исследование нестационарных тепловых процессов в условиях литья с опрессовкой кристаллизующегося металла давлением .....	35
<b>Шутиков М.А., Феофанов А.Н., Фролов Е.Б.</b> Повышение эффективности выпуска годной продукции путем внедрения в технологический процесс координатно-измерительной машины после ответственной операции с дальнейшей загрузкой в MES-систему .....	41

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

<b>Адаскин А.М.</b> Повышение теплостойкости твердых сплавов легированием связки тугоплавкими металлами .....	44
<b>Таймасова Л.А., Атрощенко В.В., Ватуев М.В.</b> Исследование технологических возможностей различных способов изготовления пазов в деталях ГТД из жаропрочных сплавов .....	49

**Блохин Д.А., Дроздов И.Н.**

Составление карты точности перемещений стола фрезерного станка под нагрузкой..... 53

**Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Желтиков С.А.**

Исследование процесса формообразования винтовых поверхностей червячными фрезами..... 57

**РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ****Илюхин Ю.В., Топорин А.А.**

Анализ методов построения подсистем компьютерного зрения мобильных роботов..... 63

**Макаров А.Д., Марсов В.И., Марсова Е.В., Джабраилов Х.А., Антонова Е.О.**

Выбор манипуляционной системы с оптимальной кинематической структурой..... 70

**Евдокимова Т.С., Каляшина А.В., Фаткуллина Л.Ф., Валиева Д.З.**

Информационное обеспечение траектории движения мобильного робота в ограниченном пространстве ..... 74

**СОБЫТИЯ И ДАТЫ**

Поздравление с юбилеем проф. Подураеву Ю.В. .... 80

**НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

Алфавитный указатель статей, опубликованных в журнале «Вестник МГТУ «Станкин» в 2021 году ..... 81

## CONTENTS

### AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Martinova L.I, Tsay S.Yu.**  
The development of canned turning cycles ..... 8
- Derkach E.V., Nezhmetdinov R.A.**  
Development of methods and algorithms for testing of logical control systems..... 13
- Nezhmetdinov R.A., Melikov P.I., Kovalev I.A., Sokolov S.V.**  
Development of a 3d-laboratory printing stand for the food industry..... 19
- Makhov A.A.**  
Quality improvement of educational and amateur Arduino projects by using 3d-modelling ..... 25
- Shvartsburg L.E., Ivanova N.A., Ryabov S.A., Kulizade D.I.**  
Energy analysis and environmental friendliness of technological processes of mechanical processing ..... 30
- Denisov M.S.**  
Investigation of unsteady thermal processes in casting conditions with pressure testing of crystallizing metal ..... 35
- Shutikov M.A., Feofanov A.N., Frolov E.B.**  
Improving the efficiency of the production of suitable products by introducing a coordinate measuring machine into the technological process after a responsible operation with further loading into the MES system ..... 41

### TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

- Adaskin A.M.**  
Increasing the heat resistance of hard alloys due to alloying bonding with refractory metals..... 44
- Taymasova L.A., Atroshenko V.V., Vatiev M.V.**  
Investigation of the technological capabilities of various methods of making grooves in GTE parts from heat-resistant alloys ..... 49

**Blokhin D.A., Drozdov I.N.**

Mapping accuracy of movements of the milling machine table under loading ..... 53

**Petukhov Y.E., Domnin P.V., Zheltikov S.A.**

Investigation of the process of forming helical surfaces by hob cutters ..... 57

**ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS****Ilyukhin Yu.V., Toporin A.A.**

Analysis of methods for constructing computer vision subsystems of mobile robots ..... 63

**Makarov A.D., Marsov V.I., Marsova E.V., Dzhabrailov K.A., Antonova E.O.**

Selection of a manipulation system with an optimal kinematic structure ..... 70

**Evdokimova T.S., Kalyashina A.V., Fatkullina L.F., Valieva D.Z.**

Information support of the trajectory of movement of a mobile robot in a limited space ..... 74

**EVENTS AND DATES**

Congratulatory on the anniversary of Yu.V. Poduraev ..... 80

**SCIENTIFIC INFORMATION**

Alphabetical index of the articles published in "Vestnik MSUT "Stankin" journal in 2021 ..... 81

---

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

---

УДК 681.5:004.415.25

Л.И. Мартинова, С.Ю. Цай  
L.I. Martinova, S.Yu. Tsay

## РАЗРАБОТКА ПОСТОЯННЫХ ЦИКЛОВ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

## THE DEVELOPMENT OF CANNED TURNING CYCLES

*Обосновывается необходимость и изложена методика создания постоянных циклов для систем ЧПУ. Представлена разработка цикла токарной обработки поверхностей типа выточек; определены ключевые моменты, приведены примеры реализации цикла в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол».*

*The necessity is justified and the method of creating canned cycles for CNC systems is described. The development of the canned cycle of turning surfaces of the type of the groove is presented; the key points are identified, examples of the implementation of the canned cycle in the CNC system «AxiOMA Control» are given.*

**Ключевые слова:** система ЧПУ, постоянные циклы, параметрические программы, циклы точения.

**Keywords:** CNC system, canned cycles, parametric programs, turning cycles.

### Введение

Одной из ключевых тенденций развития современных систем ЧПУ, является расширение функциональных возможностей, упрощающих процесс программирования [1]. Растущий промышленный спрос на детали сложной формы стимулирует разработчиков и производителей выпускать системы ЧПУ со встроенными наборами циклов, реализующих технологические переходы.

В разных системах ЧПУ наборы постоянных циклов различаются, но наиболее широко распространены циклы обработки отверстий, нарезания резьбы, циклов контурного точения и фрезерования, а также циклы обработки элементарных поверхностей типа фасок, канавок и др. [2].

Использование циклов дает ряд преимуществ при программировании систем ЧПУ [3, 4], которые связаны с такими факторами, как

- уменьшение размера управляющей программы, поскольку часть кода содержится в структуре цикла, а в главной программе записывается только код вызова цикла с указанием геометрических параметров обрабатываемого элемента детали;
- простота программирования обработки — программисту не нужно продумывать логику и вы-

полнять расчеты для реализации технологического перехода, поскольку это заложено в цикле.

На современном рынке систем ЧПУ лидирующие места среди производителей высокотехнологических систем управления занимают фирмы Siemens, Fagor, Fanuc [5]. Их системы ЧПУ располагают наборами постоянных циклов, но пользователи системы ЧПУ часто сталкиваются с тем, что этих наборов недостаточно для программирования обработки сложных деталей [6], либо предлагаемые циклы не обеспечивают технические требования, заданные чертежом конкретной детали, что отражено знаками «-» в таблице 1. Поэтому пользователю необходимо либо запрограммировать обработку «вручную» (если данный вид конструктивного элемента встречается не часто среди деталей номенклатуры), либо заказывать у производителей систем ЧПУ разработку необходимых циклов, что связано с дополнительными финансовыми затратами.

Так, в системах ЧПУ FAGOR и FANUC (табл. 1) пользователь ограничен в возможностях использования цикла ввиду отсутствия определенных параметров. Данные циклы позволяют получать только канавки, которые являются частным случаем выточек. В то время как в системе ЧПУ SINUMERIK можно



Таблица 1. Анализ циклов систем ЧПУ разных производителей

Система ЧПУ	Параметры выточки					
	Глубина	Ширина	Внутренние радиусы	Внешние радиусы	Углы наклона боковых сторон	Плоскость интерполяции
SINUMERIK	+	+	+	+	+	XZ
FAGOR	+	+	-	-	-	XZ
FANUC	+	+	-	-	-	XZ

выточку различной конфигурации и исполнения, в том числе и канавку.

Таким образом, даже популярные системы ЧПУ далеко не всегда обладают необходимым пользователю набором постоянных циклов [7, 8], и далеко не всегда они предоставляют пользователю создавать свои постоянные циклы. Система ЧПУ «АксиОМА Контроль», являясь открытой масштабируемой системой, позволяет создавать собственные постоянные циклы в виде параметрических программ, которые могут пополнять библиотеку циклов.

#### Анализ токарных циклов точения выточек и канавок

«Выточки» или «канавки» — это сочетание поверхностей конструктивного или технологического назначения. Они имеют ограниченный набор геометрических параметров, основные из которых, в частности, приведены в таблице 2, и их обработка реализуется несколькими стратегиями (табл. 3). При этом имеет смысл использовать постоянные параметризованные циклы для программирования такого вида обработки.

Таблица 2. Конструктивный анализ элементов типа «выточка»

Изображение	Параметры
	<p><math>R, R_1</math> — радиус/фаска  <math>f</math> — ширина выточки  <math>d</math> — диаметр тела вращения  <math>d_f</math> — наружная резьба</p>
	<p><math>R, R_1</math> — радиус/фаска  <math>f</math> — ширина  <math>d</math> — диаметр тела вращения  <math>d_f</math> — внутренняя резьба</p>
	<p><math>R, R_1</math> — радиус/фаска  <math>f</math> — ширина  <math>d_f</math> — наружная резьба</p>

Таблица 3. Анализ стратегий обработки выточек

Стратегия обработки	Применение	Изображение
Многokrатное врезание	Для глубоких и широких выточек (глубина больше ширины)	
Плунжерное точение	Для широких и неглубоких выточек (ширина больше глубины)	
Врезание под углом вразгонку	Для широких выточек	

**Разработка цикла точения наружной выточки**

Цикл может быть написан либо в строке управляющей программы, либо через диалоговое окно системы ЧПУ. Параметры цикла записываются в строго определенной последовательности [3].

В общем случае создание токарного цикла включает несколько этапов:

- определение геометрических параметров цикла;
- разработка алгоритма работы цикла;
- программная реализация цикла и тестирование.

В качестве примера, рассмотрим процесс создания токарного цикла точения выточки.

Выточка, представленная выше, будет характеризоваться следующими геометрическими параметрами:

width — ширина выточки, которая позволит задать ее форму; depth — глубина выточки, которая позволит задать ее форму; ang1, ang2 — углы наклона боковых сторон выточки, позволяющие описать несимметричность выточки; rad1, rad2 — радиусы выточки, позволяющие изменять форму выточки; or\_start, ab\_start — координаты начальной точки, из которой начинается работа цикла.

Блок-схема алгоритма работы цикла представлена на рис. 2.

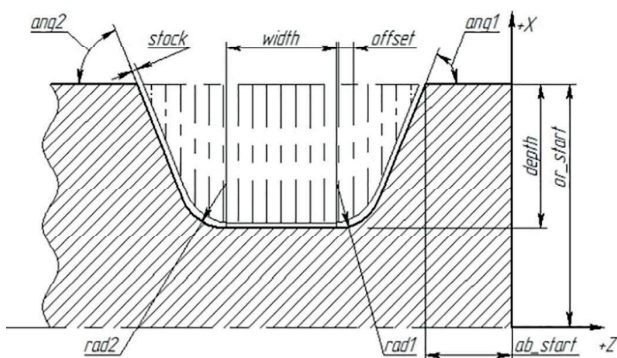


Рис. 1 — Пользовательские параметры разрабатываемого цикла

При использовании цикла пользователю требуется ввести основные геометрические параметры выточки и технологические параметры процесса обработки для правильного функционирования цикла. После ввода всех требующихся параметров система производит расчет внутренних переменных, из которых и образуются траектории движения, позволяющие правильно работать циклу. После проведения расчетов в шпиндель станка устанавливается выбранный пользователем инструмент, и начинается черновая обработка.

Стратегия обработки включает в себя следующие действия: инструмент перемещается на определенный

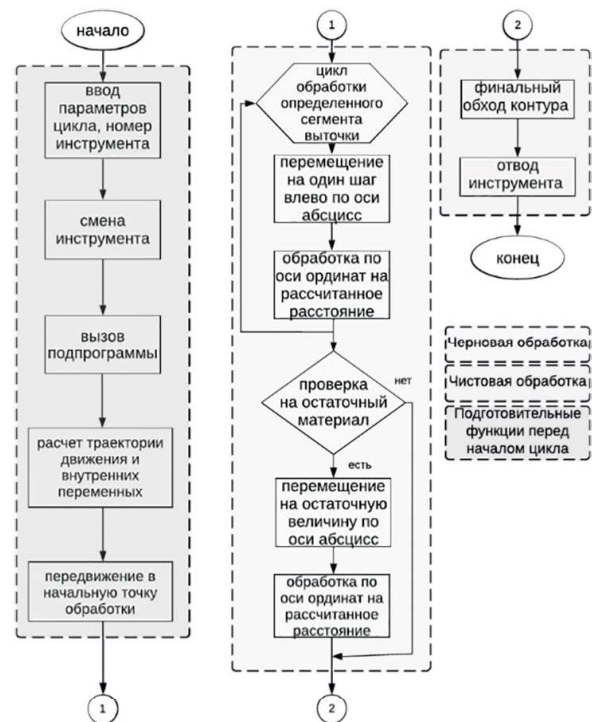


Рис. 2 — Алгоритм работы цикла точения наружной выточки

шаг, равный его ширине; после перемещения влево, резец опускается; осуществляя снятие материала на глубину, рассчитанную в соответствии с введенными оператором данными, что определяется кодом:

```
for (ii=1; ii<=steps_for_fall; ii++)
{
  G00 AXSTR(sGAx) = - offset (1)
  G01 AXSTR(sFAx) = - (offset*ii*tan(ang1) - stock)
  G01 AXSTR(sFAx) = (offset*ii*tan(ang1) - stock)
}
```

где *offset* — сдвиг по оси *z*, *ang1* — угол наклона боковой стороны, *stock* — припуск на чистовую обработку.

После прохождения всей ширины выточки завершается черновая обработка. Инструмент возвращается в точку начала цикла с учетом безопасного расстояния для осуществления чистового прохода:

```
G01 AXSTR(sFAx)=-(depth-or_r1) AXSTR(sGAx)=
  -((depth-or_r1)/tan(ang1))
G02 AXSTR(sFAx)=or_r1 AXSTR(sGAx)=
  -(hypo1+ab_r1) R=rad1
G01 AXSTR(sGAx)=-(width) (2)
G02 AXSTR(sFAx)=or_r2 AXSTR(sGAx)=
  -(hypo2+ab_r2)
  R=rad2
G01 AXSTR(sFAx)=(depth-or_r2) AXSTR(sGAx)=
  -((depth-or_r2)/tan(ang2))
```

где *depth* — глубина, *ang1* и *ang2* — углы наклона боковой стенки, *rad1* и *rad2* — радиус скруглений.

Цикл завершается отводом инструмента и сбросом всех модальных функций [6]. На рисунке 3 представлена эмуляция выполнения цикла.

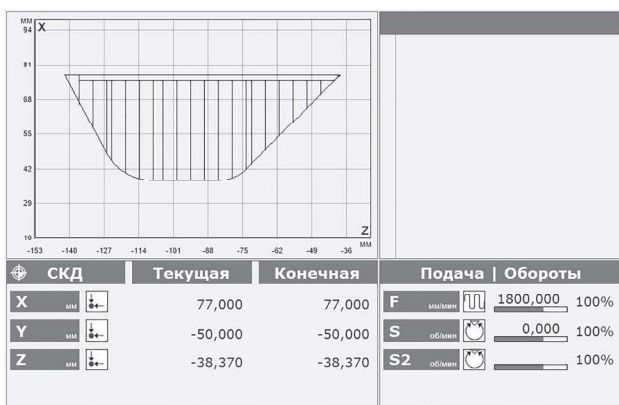


Рис. 3 — Результат работы цикла

### Заключение

Постоянные циклы являются важным атрибутом современных систем ЧПУ, позволяющим с высокой

эффективностью использовать ресурсы систем ЧПУ, сокращая время технологической подготовки и разработки управляющих программ. На примере поверхностей типа выточек продемонстрировано, как на основе конструктивно-технологического анализа выявляются параметры и формируется стратегия реализации постоянного цикла. Использование постоянных циклов при разработке управляющих программ значительно упрощает и сокращает длительность процесса программирования.

### Библиографический список

1. **Мартинов Г.М., Пушков Р.Л.** Построение инструментария отладки управляющих программ систем ЧПУ на языках высокого уровня // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 11. С. 19–24.
2. **Martinov, G., Kozak, N. and Nezhmetdinov, R.** (2018). Approach in Implementing of Logical Task for Numerical Control on Basis of Concept “Industry 4.0”. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728584>
3. **Roman Pushkov, Evgeniy Salamatin, Svetlana Evstafieva** (2018). Method of developing parametric machine cycles for modern CNC systems using high-level language. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10–14, 2018. pp.1–7 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401116>
4. **Мартинова Л.И., Мартинов Г.М.** Мировые тренды, возможности и перспективы развития систем ЧПУ станочного оборудования // СТИН, № 7. 2019. с. 28–31.
5. **Мартинова Л.И., Фокин Н.Н.** Подход к созданию унифицированной системы программирования токарно-фрезерных станков с ЧПУ в диалоговом режиме // Автоматизация в промышленности, № 5. 2019. с. 14–17.
6. **Цай, С.Ю.** Разработка параметрического цикла обработки поверхностей типа «выточка» для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» / Цай С.Ю., Мартинова Л.И. // Материалы студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ–2020)». Том 4: Сборник докладов института автоматизации и робототехники. — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2020. — 281 с.
7. **Мартинова Л.И., Фокин Н.Н.** Подход к созданию унифицированной системы программирования токарно-фрезерных станков с ЧПУ в диалоговом режиме // Автоматизация в промышленности, № 5. 2019. с. 14–17
8. **Пушков Р.Л., Саламатин Е.В., Евстафиева С.В.** Практические аспекты применения языка высокого уровня в системе ЧПУ для реализации групповой обработки // Автоматизация в промышленности, № 5. 2018. с. 31–34.

**Мартинова Лилия Ивановна** – канд. техн. наук, доц. кафедры компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*edu.l.martinova@gmail.com*

**Цай Светлана Юрьевна** – магистрант кафедры компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*svetlanatsay@mail.ru*

**Martinova Lilia Ivanovna** – Candidate of Technical Sciences Associate Professor of the Department of Computer Control Systems of MSUT «STANKIN»  
*edu.l.martinova@gmail.com*

**Tsay Svetlana Yurievna** – Master’s student of the Department of Computer Control Systems of MSUT «STANKIN»  
*svetlanatsay@mail.ru*

---

---

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМОВ СТЕНДОВОГО ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

## DEVELOPMENT OF METHODS AND ALGORITHMS FOR TESTING OF LOGICAL CONTROL SYSTEMS

Статья посвящена практическим аспектам процесса тестирования систем логического управления. Представлена методика тестирования систем, состоящая из пяти последовательных шагов. Результаты выполнения каждого шага являются входными данными для последующего. В результате применения методики мы получаем систему управления и отчет об обнаруженных ошибках, на основе которых можно проводить доработку. В качестве примера рассмотрено функциональное тестирование ядра программно реализованного логического контроллера. Описаны алгоритмы реализации функционального тестирования в ручном и автоматизированном режиме.

The article is devoted to the practical aspects of the testing logical control systems. The methodology testing consisting of five consecutive steps is presented and described in detail. The result of each step is the input data for the next one. As a result of applying this methodology at the final stage, a tested control system and a report on detected errors are obtained. As an example, the functional testing of the core of a software-implemented logical controller is considered. Algorithms of manual and automated functional testing are described.

**Ключевые слова:** автоматизация, система логического управления (СЛУ), тестирование, функциональное тестирование, методика тестирования, структура СЛУ.

**Keywords:** automation, logical control system (LCS), testing, functional testing, test method, structure LCS.

**Введение.** Рассматривая широкий круг проблем, с которыми сталкиваются разработчики при проектировании систем логического управления (СЛУ), можно отметить задачу тестирования [5, 8]. Использование совершенных быстро модифицируемых средств контроля — специализированных стендов — является решением, обеспечивающим эффективность и надежность разрабатываемых систем.

Область тестирования СЛУ отличается тем, что по ней представлено крайне мало печатных работ, в особенности научной направленности [5, 6, 7]. В связи с этим актуальным является вопрос создания методики и алгоритмов контроля работоспособности СЛУ на основе применения стендов тестирования.

**1. Методика тестирования систем логического управления с использованием специализированных испытательных стендов.** Приведенная в статье методика тестирования систем логического управления позволяет проверять работоспособность промышленных систем, дифференцируя их по структуре, а также позволяет реализовывать помодульное тестирование программного обеспечения. Использование в методике специализированного испытательного стенда позволяет устранить наибольшее число ошибок в системах логического управления, имеющих критическое значение для безопасности и безаварийной работы оборудования. Основные этапы предлагаемой методики изображены на рис. 1. Рассмотрим их более подробно.

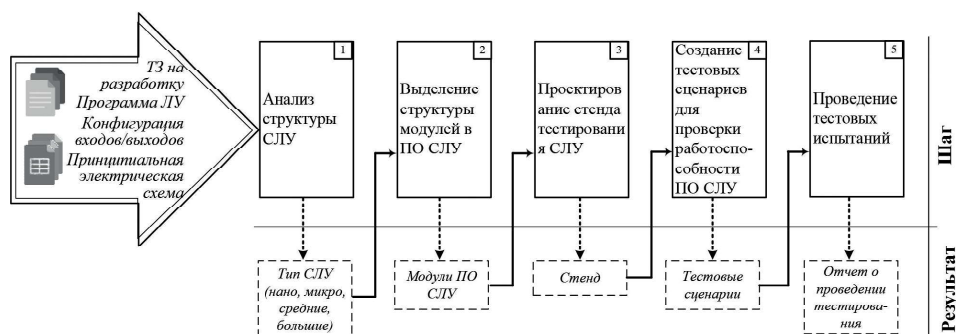


Рис. 1 — Методика стендового тестирования систем логического управления

Исходными данными для процесса тестирования являются техническое задание на разработку, программа логического управления тестируемой СЛУ, а также конфигурация входов/выходов контроллера электроавтоматики. На основе данных о количестве входов/выходов системы производится анализ автоматизированной системы с целью отнесения ее к одному из четырех возможных вариантов (шаг 1). По данному критерию все системы логического управления условно делятся на:

- нано системы (nano) — менее 15 точек ввода/вывода;
- микро системы (micro) — 15-128 точек ввода/вывода;
- средние системы (medium) — 128-512 точек ввода/вывода;
- большие системы (big) — более 512 точек ввода/вывода.

Результатом первого шага будет принятое решение о том, с системой какого типа предстоит работать на дальнейших этапах реализации методики. На основе проведенного анализа различных источников [4, 3, 9] было выявлено, что наиболее часто встречаемые варианты систем управления предполагают наличие от 15 до 512 входов/выходов (микро и средние СЛУ). Выбор производится в зависимости от конкретно поставленной задачи.

СЛУ, имеющие менее 100 управляющих и входных разъемов, реже нуждаются в детальной проверке работоспособности, поэтому в данной методике за базу берутся СЛУ, имеющие от 100 и более входов/выходов. Тестирование таких систем будет проводиться с выделением отдельных логических модулей с использованием модульного принципа тестирования. В связи с этим на следующем шаге методики производится выделение структуры модулей в программном обеспечении СЛУ (шаг 2).

На основе сформированных модулей системы логического управления, с учетом их группировки по назначению либо по основным функциональным узлам объекта управления, разрабатывается и собирается стенд тестирования (шаг 3). Структурно стенд включает в себя те же группы элементов, которые были получены при разделении системы на логически обособленные компоненты (модули).

Наличие готового стенда тестирования позволяет перейти к следующему шагу методики, представляющему собой разработку тестовых сценариев для проверки работоспособности программы логического управления СЛУ (шаг 4). Алгоритмы тестирования подробно будут описаны ниже.

Следующим шагом методики является непосредственное проведение тестовых испытаний на разработанном специализированном стенде с помощью составленных тестовых сценариев и набора тест-кейсов (шаг 5). Результатом выполнения 5 шага методики тестирования систем логического управления является

сформированный отчет об ошибках (bag report). Отчет об ошибках — это технический документ, описывающий ситуацию и/или последовательность действий, приведшую к некорректной работе объекта тестирования, с указанием причин и ожидаемого результата. При этом важно, чтобы подобного рода отчет был результативным, т. е. способствовал устранению как можно большего количества ошибок в программе.

По итогам проведения пятого, заключительного, шага методики тестирования СЛУ на основе отчета об ошибках принимается решение о необходимых мерах по устранению обнаруженных ошибок и нерегулярных ситуаций.

**2. Создание алгоритмов тестирования систем логического управления.** Для лучшего понимания работы предлагаемых алгоритмов тестирования рассмотрим пример функциональной проверки работоспособности исполнительного ядра системы логического управления, построенной на базе программно реализованного логического контроллера — SoftPLC. Рассмотрим отдельно ручное и автоматизированное тестирование.

Являясь по существу программным обеспечением, SoftPLC находится в процессе постоянной доработки существующих и добавления новых функций.

Тестовые программы были реализованы на одном из стандартных языков программирования контроллеров — языке функциональных блоков FBD (язык стандарта МЭК 61131 [2]).

**2.1. Автоматизированное функциональное тестирование.** В качестве примера реализации автоматизированного функционального тестирования используем логические блоки среды языка FBD, а конкретно, операцию логического умножения AND и отрицание логического сложения OR-NOT. Учитывая бинарный характер входов и выходов (принимают значения либо 0, либо 1) логических операций, а значит и небольшой набор возможных сочетаний входов-выходов блока, можно автоматизировать процесс тестирования.

Для этого в среде программирования однократно составляется управляющая программа из логических блоков, объединенная в единый пользовательский блок, которому назначаются определенные входы и выходы. Структура его показана на рис. 2, и в дальнейшем он может быть использован как самостоятельный элемент. Для инициализации процесса тестирования необходимо однократно подать на вход блока два управляющих сигнала и получить значение на выходе. Успешное тестирование фиксируется при достижении логической 1 на выходе пользовательского блока. Если же значение на выходе равно 0, то тестовый сценарий считается непройденным, т.к. блок работает с ошибкой. На рисунке 2 представлена общая схема алгоритма работы автоматизированного тестирования функциональных блоков.

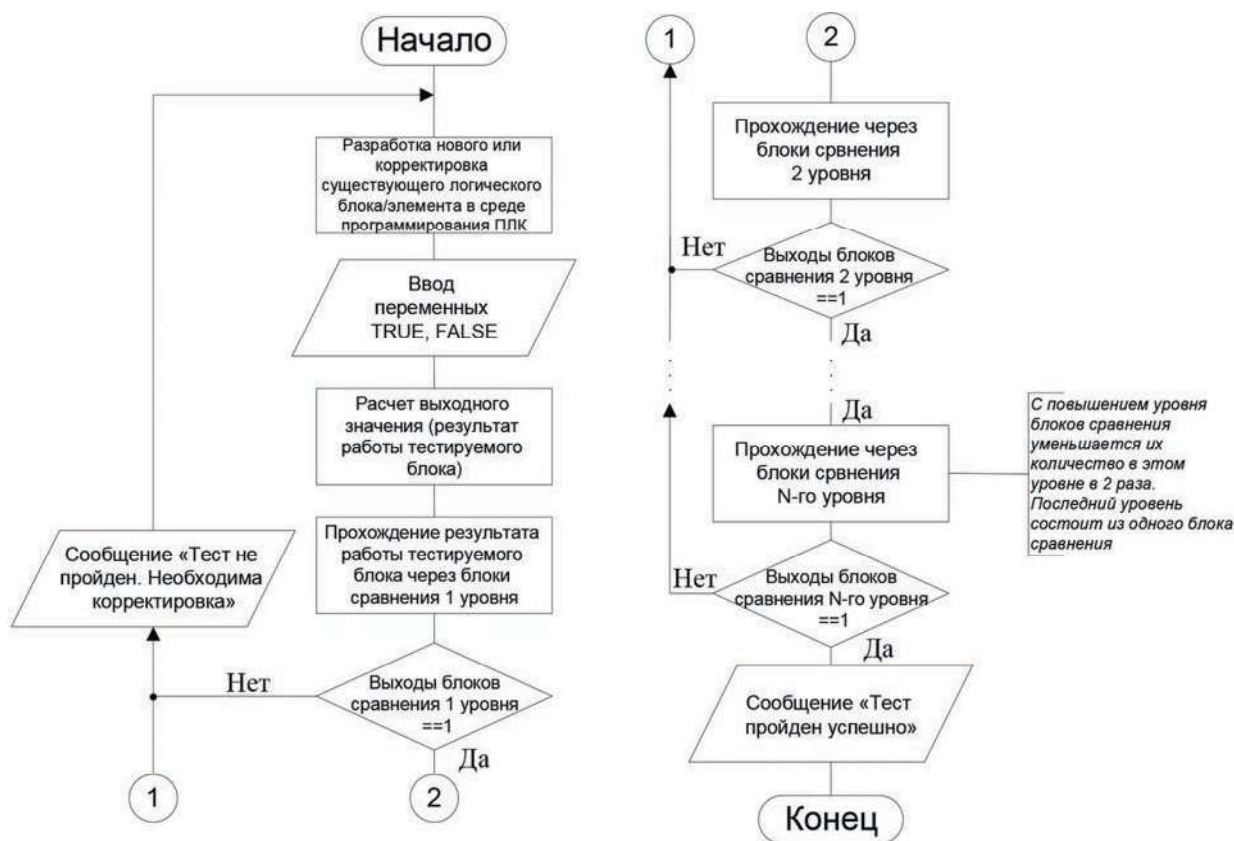


Рис. 2 – Алгоритм работы автоматизированного тестирования функциональных блоков

Ниже проиллюстрирован пример реализации алгоритма работы автоматизированного тестирования. Пример представляет собой тестирование AND-блока (рис. 3).

Аналогичным образом тестируются логические блоки OR-NOT, AND-NOT, XOR и др.

**2.2. Функциональное тестирование в ручном режиме.** Для примера реализации ручного тестирования рассмотрим тестирование блоков арифметических операций, а именно, сложение, вычитание и умножение. Данные операции предполагают большое количество возможных тестовых случаев,

а также число граничных значений и классов эквивалентности (положительные, отрицательные числа, ноль и их комбинации), в отличие от логических операций. Поэтому для арифметических операций наиболее подходящим является ручное тестирование. Проверку работоспособности сложения и вычитания выполним в едином блоке путем различных комбинаций этих двух операций, а для умножения составим отдельный блок.

Для выполнения всестороннего тестирования формируется набор тестовых сценариев, которые последовательно обрабатываются оператором (табл. 1).

Таблица 1. Пример создания тест-кейсов для ADD-SUB-Test и MUL-Test (фрагмент)

ADD-SUB-Test						MUL-Test				
	тест-кейс 1	тест-кейс 2	тест-кейс 3	тест-кейс 4	тест-кейс 5	тест-кейс 1	тест-кейс 2	тест-кейс 3	тест-кейс 4	тест-кейс 5
<b>A</b>	28	521	3	609	91	2	21	3	-11	91
<b>B</b>	63	-124	51	225	-36	-8	-124	51	-18	-36
<b>C</b>	17	715	-14	850	84	3	-15	-14	-469	84
<b>D</b>	42	-359	-92	476	18	-6	108	-92	-75	18
<b>T_V</b>	39	327	20	368	98	560	88 585 476	591 345	-76 610 952	-450 754 668

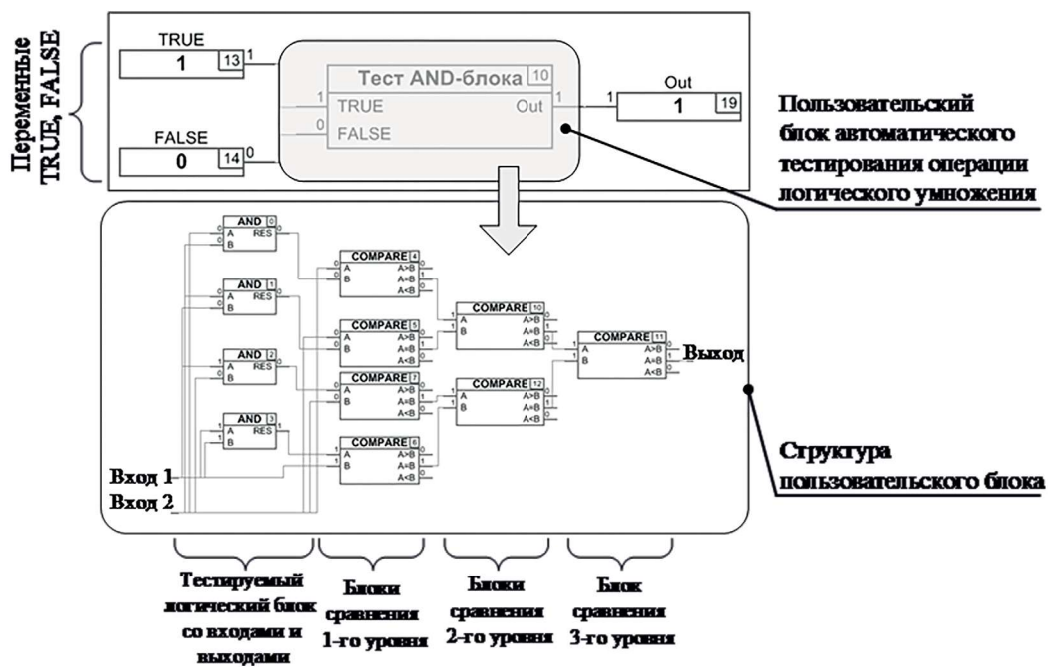


Рис. 3 – Автоматизированное тестирование функциональных блоков (пример 1)

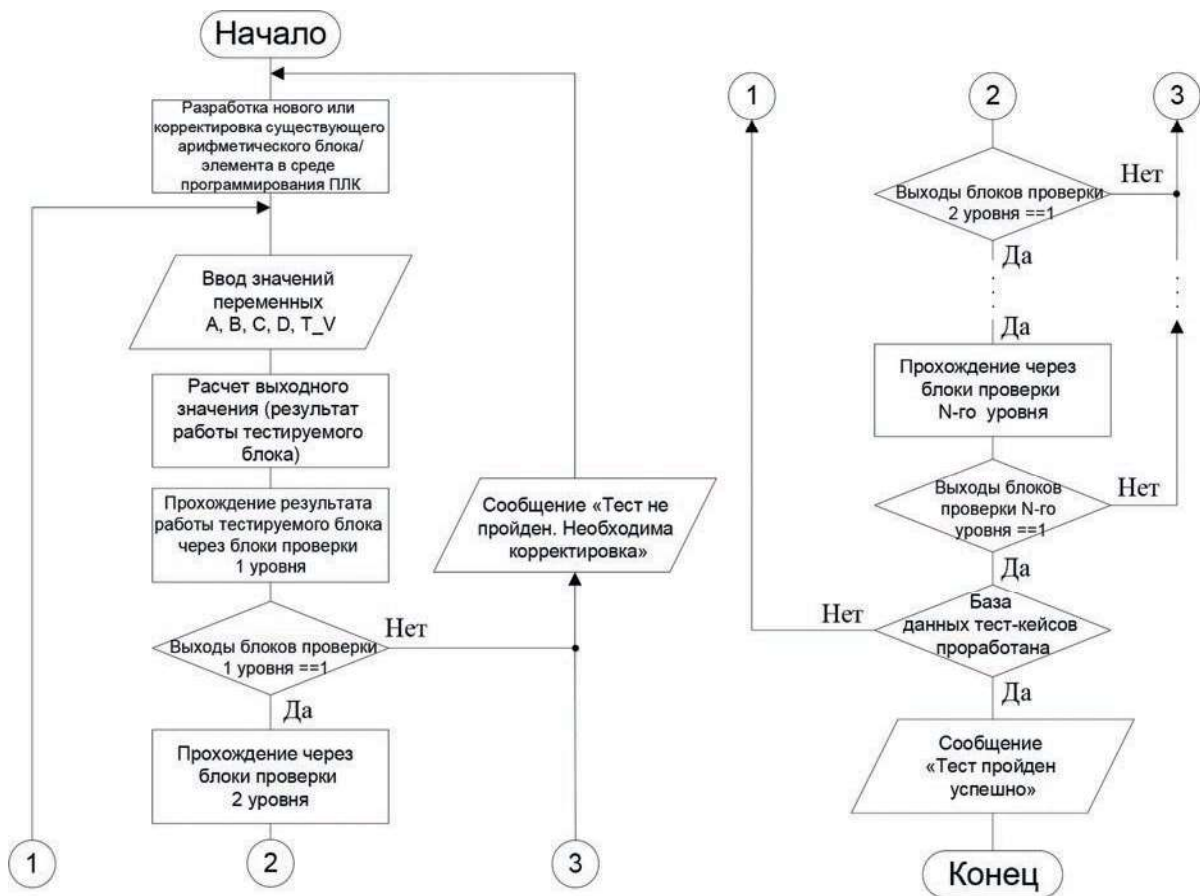


Рис. 4 – Алгоритм работы ручного тестирования функциональных блоков



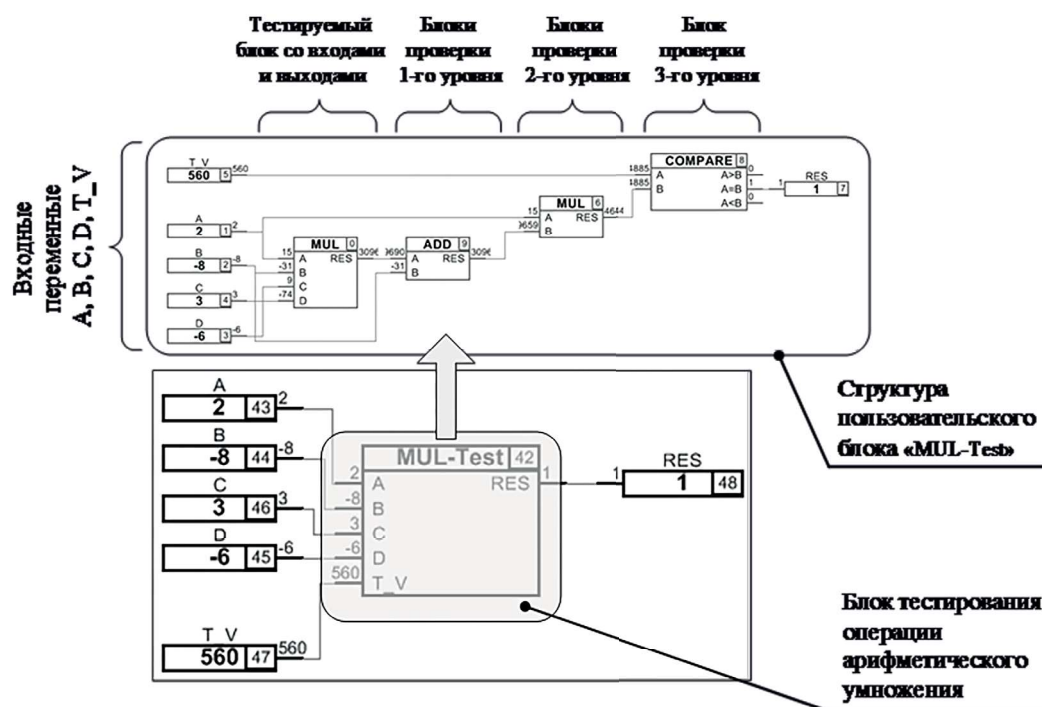


Рис. 5 – Пример ручного тестирования функционального блока арифметического умножения

На входы A, B, C, D блока тестирования (рис. 4) подаются значения из заранее подготовленных тест-кейсов, которые обрабатываются в соответствии с заданным алгоритмом. Затем выходное значение сравнивается с заранее рассчитанным, зафиксированным также в таблице тест-кейсов (вход T\_V). Если они совпадают, то на выходе управляющей программы фиксируется 1. Это означает, что «Тест пройден успешно». Если на выходе получается 0, то фиксируется наличие ошибки, и, таким образом, «Тест не пройден. Необходима корректировка».

На рис. 5 проиллюстрирован пример реализации алгоритма работы ручного тестирования блока арифметического умножения, а в табл. 1 приведен фрагмент тестового сценария для него.

Аналогичным образом проводится тестирование операций арифметического сложения и вычитания.

**Заключение.** Предложенная методика позволяет быстро и эффективно использовать ее для тестирования вновь разрабатываемых или прошедших доработку систем логического управления. Получаемый на заключительном этапе методики отчет об ошибках является эффективным средством отладки обнаруженных нерегулярных ситуаций и сбоев. Используемые в методике алгоритмы тестирования применимы для ручного и автоматизированного тестирования. Приведен пример их использования для управляющих программ, написанных на языке функциональных блоков (FBD, стандарт МЭК 61131 [2]).

## Библиографический список

1. Гленфорд Майерс. Искусство тестирования программ, 3-е издание. / Гленфорд Майерс, Том Баджетт, Кори Сандлер. – Москва: Диалектика, 2012. – 272 с.
2. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2016. – 279 с.
3. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А. Модульный подход к построению специализированной системы ЧПУ для обрабатывающих центров наклонной компоновки // СТИН. 2014. Т. 11. С. 28–33.
4. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А. Разработка средств визуализации и отладки управляющих программ для электроавтоматики, интегрированных в систему ЧПУ // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 4 (23). С. 134–138.
5. Мартинов, Г.М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования / Г.М. Мартинов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 1. – С. 119–125.
6. Машиностроение – традиции и инновации (МТИ-2014) [Текст] : материалы VII международной научно-образовательной конференции, ноябрь 2014 г.: [сборник докладов] / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Московский гос. технологический ун-т

(СТАНКИН). – Москва: СТАНКИН, 2014. – 145 с.: ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-7028-0721-8

7. Повышение качества архитектурных решений систем ЧПУ на основе программно реализованного контроллера типа Soft PLS, Нежметдинов Р.А., Шемелин В.К., Автоматизация. Современные технологии. 2008. № 6. С. 33–36.

8. Современные технологические тренды развития станкостроения в России / Баурина, С.Б., Савчен-

ко Е.О. // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. – 2019. – № 2 (104). – С. 81–92.

9. Способ построения инструментария систем мониторинга и настройки параметров мехатронного технологического оборудования на основе специализированных программных средств, Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Соколов С.В., Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7. С. 45–50.

*Деркач Елена Валентиновна* – преподаватель кафедры компьютерных систем управления

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*derkach.e.v@yandex.ru*

*Нежметдинов Рамиль Амирович* – д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерных систем управления

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*neramil@gmail.com*

*Derkach Elena Valentinovna* – teacher of the sub-department of «Computer control systems» of MSUT

«STANKIN»

*derkach.e.v@yandex.ru*

*Nezhmetdinov Ramil Amirovich* – Dr. Sc. of Engineering, professor of the sub-department of «Computer control systems» of MSUT «STANKIN»

*neramil@gmail.com*

## РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### DEVELOPMENT OF A 3D-LABORATORY PRINTING STAND FOR THE FOOD INDUSTRY

*В представленной статье рассматривается задача построения специализированной установки для пищевой 3D печати, которая позволяет осуществлять печать различными пищевыми полуфабрикатами с минимальной переналадкой или без неё. Разработанная установка, включая все её программно-аппаратные компоненты, должна быть гибкой и по характеристикам оборудования и системы управления должна быть не хуже существующих на рынке аналогов, но иметь большую функциональность и меньшую цену. Разработка таких компактных решений позволит использовать их как для небольших кафе, ресторанов, так и на крупных предприятиях.*

*In the presented article, the problem of building a specialized laboratory stand for food 3D printing is considered, which allows printing with various food semi-finished products with minimal changeover or without it. The developed laboratory stand, including all its software and hardware components, should be flexible and, according to the principles of construction and use, should approach the analogs of additive equipment existing on the market and to the classical control systems corresponding to it, but have greater functionality and lower cost. The development of such compact solutions will allow them to be used both for small cafes, restaurants, and in large factories.*

**Ключевые слова:** 3d печать, система ЧПУ, автоматизация, web-разработка, схемотехника, пищевая промышленность.

**Keywords:** 3d printing, CNC system, automation, web development, circuitry, food industry.

#### Введение

Уровень автоматизации производственных процессов неуклонно растет с каждым годом, в том числе он повышается и на пищевых производствах, таких как кондитерские фабрики, малые рестораны и др. Практически ни одно современное пищевое производство не может обойтись без использования автоматизированного оборудования, так как его использование позволяет изготавливать пищевые изделия, к которым предъявляются требования по точности рецептурной базы и воспроизводимости технологических условий (температуры, времени обработки и др.).

В современном мире пищевое производство кондитерских изделий сложных геометрических форм и различной цветовой гаммы полностью ручное. Указанный тип производства не позволяет получить изделия с высокой воспроизводимостью и точностью, а также отличается низкой производительностью [1, 2].

Предложенная работа направлена на повышение уровня автоматизации процесса производства кондитерских изделий и систематизацию методов проектирования кондитерских изделий за счет применения инструментальных средств и программных пакетов, используемых в других отраслях промышленности (например, в машиностроении).

Основной целью данной работы является расширение ассортимента единичных пищевых изделий за счет применения аддитивной технологии и цифровой системы управления (серийных типов).

#### Подходы, применяемые при разработке схожих решений

Для формирования списка характеристик представленного решения, который обеспечит конкурентное рыночное преимущество и определит список требований к построению такого решения, был проведен сравнительный анализ параметров и функциональности существующих на мировом рынке установок для пищевой 3Dпечати настольного типоразмера и разработанного решения, что представлено в таблице 1.

При рассмотрении существующих на рынке решений для пищевой 3D печати, можно выделить одну закономерность: ядром автоматизации в большинстве из них выступает микроконтроллерная платформа с системой управления Marlin, машинные параметры которой были сконфигурированы под печать пищевых изделий одного типа (блины, фигурки из шоколада и др.). Такая система используется, например, у анализируемых ChocCreator V2.0 Plus (рис. 1, а) и PancakeBot (рис. 1, б)[3].

Этот факт значительно ограничивает гибкость этих систем по номенклатуре печатаемых изделий, а также

Таблица 1. Сравнение существующих решений с разрабатываемым решением

Характеристика	DISCOV3RY 2.0 COMPLETE	ChocCreator V2.0 Plus	PancakeBot	Разрабатываемое решение
Скорость печати	55 гр/час	60 гр/час	600 мл/ч	150 гр/час для шоколада и более 600 мл/ч для теста
Объём хранимого материала	2x60 мл (120 мл)	30 мл	400 мл	150-500 мл
Материал печати	Гели	Пасты (шоколад)	Пасты (тесто)	Пасты (шоколад, тесто и мороженное)
Функциональные системы	Нет (только система подачи)	Система расплавления материала	Система запекания материала	Системы расплавления, охлаждения и запекания материала
СЧПУ	Marlin	Marlin	Marlin	Marlin
Тип печати	FDM	FDM	FDM	FDM



Рис. 1 – Примеры применения пищевой 3D печати

возможность соединения отдельных установок в единую экосистему (виртуальный цех или лабораторию) для реализации централизованного управления [4, 5].

Кроме Marlin существуют аналогичные по классу системы управления: Repetier-Firmware и RepRapFirmware, но они являются закрытыми и имеют малую гибкость (количество поддерживаемых платформ мало, или состоит только из проприетарных решений) и по этим причинам они не адаптированы для пищевой 3D печати.

Стоит отметить, что у многих существующих решений отсутствует система запекания материала (например, греющийся стол), а у подавляющего большинства — система охлаждения (например, компрессорная, на основе сухого льда или модулей Пельтье), обе из которых необходимы для построения гибкой установки печати.

На основе анализа были сформулированы требования к разрабатываемой системе:

- использование полноценной операционной системы Linux в качестве терминала системы числового управления, позволяющее объединять отдельные установки вместе и обеспечивать функционирование сложного пользовательского интерфейса;

- аппаратная платформа со значительно большей мощностью и гибкостью для формирования программ управления, их запуска и предоставления дополнительных сервисов;

- установка должна включать в себя оснастку для реализации широкой гаммы возможностей печати, ориентированной на пищевую промышленность.

**Общая структурная схема разрабатываемой установки 3D печати и её узлов**

Предложенное решение построено на базе FDM принтера (англ. Fused deposition modeling, FDM — Моделирование методом послойного наплавления) для печати пластиком, который включены следующие разработанные в ходе работы модули:

- система подачи (экструдер) шоколада, состоящая из подогреваемого бункера (мастер-контур нагрева), система трубок с нагревателем, блок управления ведомым контуром нагрева и печатающей головки;
- система охлаждения, построенная на базе модулей Пельтье и управляемая системой ЧПУ;
- модуль интеграции технологий IoT на базе одноплатного компьютера.

Основные компоненты представлены на рисунке 2.

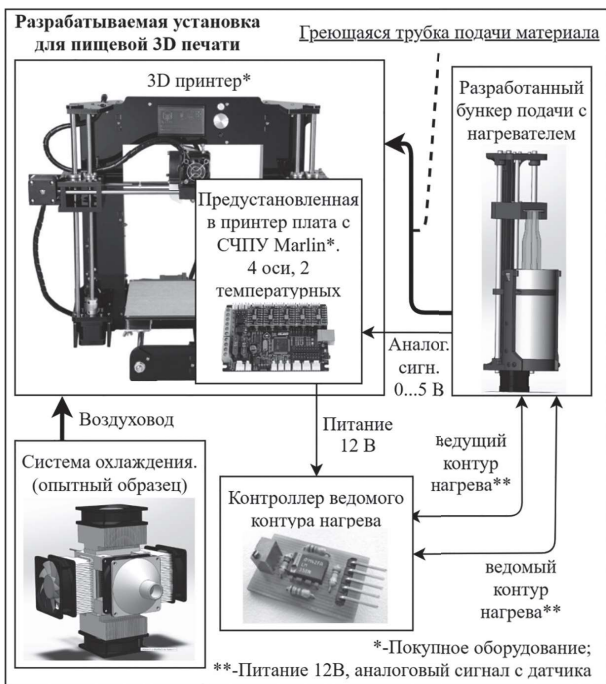


Рис. 2 – Структурная схема разрабатываемого решения

Для реализации охвата наибольшего количества материалов печати, необходима реализация систем подачи и нагрева материала, а также его охлаждения.

Существует необходимость построения системы нагрева, состоящей минимум из двух контуров, которая заключается в достижении быстрой скорости расплавления материала в бункере, поскольку большой объём материала обладает большой теплоемкостью (рисунок 3). Бункер устанавливается вне термобокса, из-за разных теплопотерь в трубке (расположенной в холодной зоне температур) и в бункере (расположенном в комнатной зоне температур) и в виду большой сложности уравнивания этих теплопотерь – подтверждается необходимость разбивки системы нагревания на два контура.

Суть представленной схемы заключается в следующем:

1) Marlin управляет температурой бункера подачи по датчику № 1, в котором хранится материал, и устанавливает на нем некоторую стабильную температуру;

2) Контроллер ведомого контура нагрева имеет два собственных датчика температуры: Датчик № 2 установлен в бункере, а Датчик № 3 установлен в греющуюю трубку подачи. Контроллер стремится поддерживать на трубке температуру равную температуре в бункере. Тем самым обеспечивается работоспособность ведомого контура нагрева.

Далее материал запекается греющимся столом (в случае с тестом) или затвердевает под действием обдува или системы охлаждения (в случае с шоколадом или мороженым).

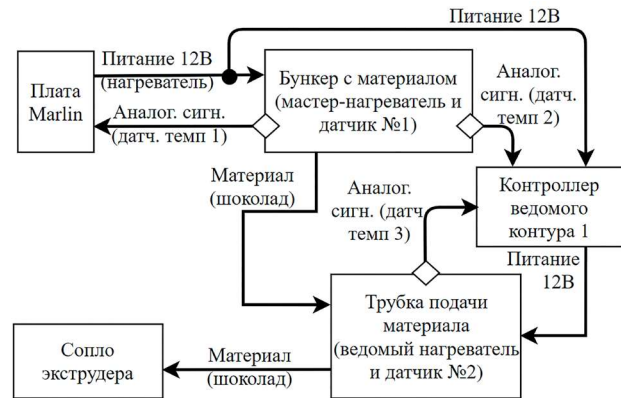


Рис. 3 – Структура двухконтурного нагрева

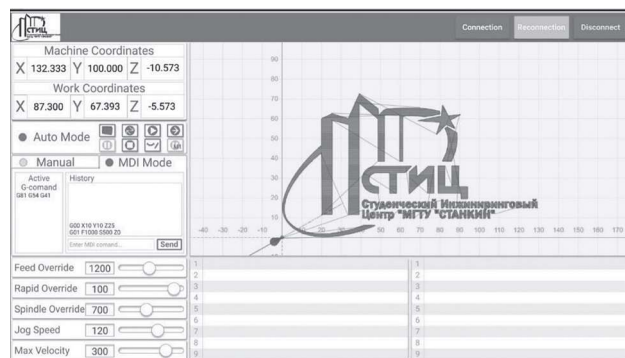


Рис. 4 – Разработанный Web-интерфейс

В качестве структурных элементов системы охлаждения предполагается использование разработанной установки на базе модулей Пельтье, что обусловлено условием компактности разрабатываемого решения.

### Практическая реализация опытного образца установки трёхмерной печати

На рисунке 4 представлен разработанный WEB-интерфейс терминала системы управления и мониторинга. Основными элементами на нем являются: «Визуализация», позволяющие наблюдать за ходом печати, группа элементов «Настройки», на которой можно менять параметры печати, и экран выбора управляющих программ [6].

В терминале реализовано все три режима, классических для систем ЧПУ: AUTO, JOG (англ. Jog – толчковый, режим ввода одного кадра перемещения), MDI (англ. ManualDataInputmode – режим ручного ввода данных) [7, 8]. Это сделано как первый шаг к унификации функциональности системы управления и её терминала. Так же частично реализованы экраны, адаптированные на пищевое производство, где, например, можно выбрать профиль печати для конкретных материалов, что в большей степени представляет собой аналог совмещения экранов «Машинные параметры» и «Инструмент» традиционных систем ЧПУ.

Под отраслевой альтернативой экрана «Машинные параметры» подразумевается выбор конфигурации подключенной оснастки или модулей для пищевой печати, а под экраном «Инструмент» – выбор различных профилей для печати конкретными материалами.

Квалификация продвинутого пользователя сделает ему доступным возможность смены конфигураций пищевой установки и профилей печати на ходу – из WEB – интерфейса [9]. Так же архитектура решения позволяет транслировать фото-поток с принтера в удаленном терминале оператора за счет возможности подключения камеры, что полезно при длительной печати или при объединении нескольких установок в один терминал управления (реализована возможность выбора и конфигураций подключений).

Ядром схемы является промышленный операционный усилитель lm158 или его потребительский аналог lm358, который включен по схеме компаратора, у которого резистором R3 обеспечен гистерезис коммутации ведомого контура нагрева.

Для реализации системы охлаждения материала, необходимой для печати шоколадом или печати отверждаемыми жидкостями (печати мороженого), необходимо обеспечить равномерный холод по всему объему печати. Для этого был реализован термобокс из теплоизолирующего материала «Пеноплекс» толщиной 5 см и теплопроводностью 0,03 Вт/м·°К.

С обратной стороны термобокса установлены два патрубка для циркуляции охлаждаемого воздуха между термобоксом и системой охлаждения. С передней стороны – устанавливается съемная дверь из того же материала, что и сам термобокс.

В соответствии с обобщенными структурными схемами (рисунки 2 и 3) разработана детальная схема и 3Dмодели узлов (в CAD модуле программы SolidWorks) системы охлаждения, подачи и нагрева.

Данные 3Dмодели были физически изготовлены (в большей степени методом 3Dпечати из пластика). Макетный вариант установки трехмерной печати для пищевой промышленности в сборе показан на рисунке 5.

**Макетные испытания опытного образца и оценка результатов**

Проведенные испытания опытного образца установки (рисунок 6) показали, что все аппаратные и программные элементы установки, кроме системы охлаждения, функционируют в заданном режиме и без сбоев при длительной работе на различных режимах печати шоколадом и при различных параметрах окружающей среды.

Результат системы охлаждения на базе модулей является отрицательным. При потреблении 150 Вт энергии поток воздуха охлаждается на 3°С. Этого недостаточно для 3Dпечати шоколадом, поэтому необходимо применение промышленного холодильника компрессорного типа, что сделает установку менее компактной [10, 11].

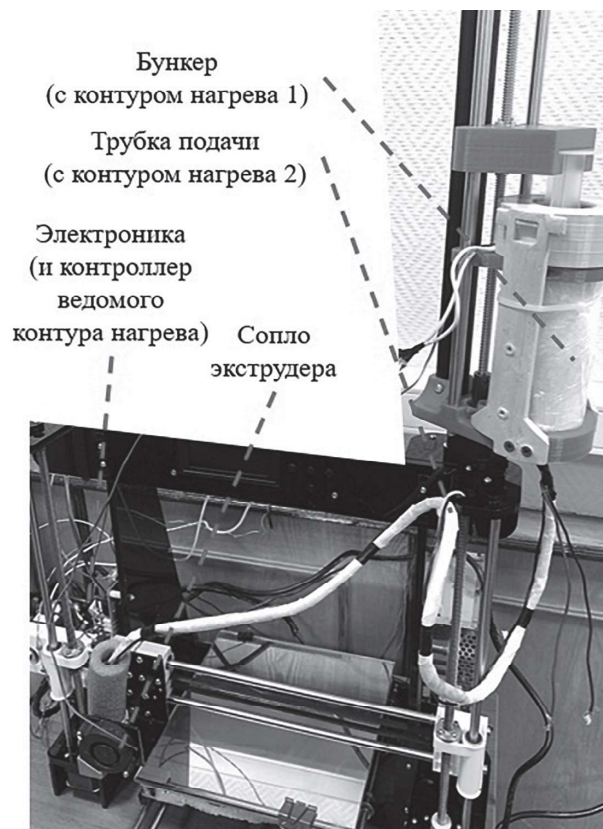


Рис. 5 – Макетный образец

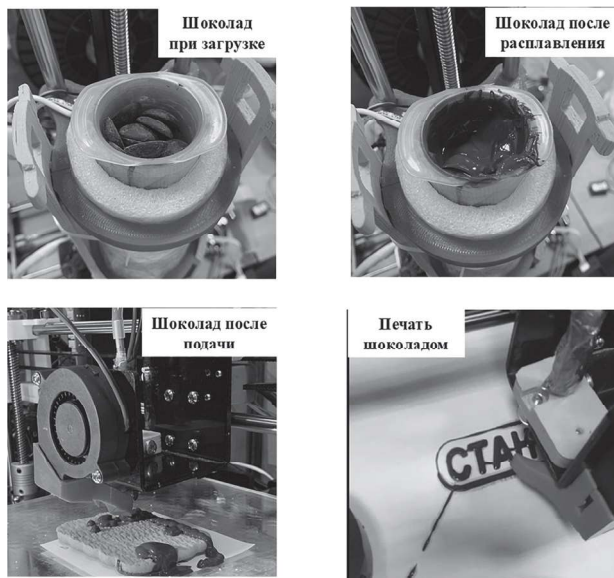


Рис. 6 – Практические испытания

Система подачи на базе двигателя Nema 17HS4401, линейного привода на базе винтовой передачи с шагом 2 мм, цилиндра объемом 160 мл<sup>3</sup> и нагревателя мощностью 40 Вт у бункера и 20 Вт у трубки работает исправно [12].

В ходе практического эксперимента отмечено, что желательнее использование более мощного мотора для большей скорости ретракта, а нагреватель бункера возможно использовать более слабый (40 Вт расплавляет шоколад и достигает равномерной температуры +35°C за 7 минут, а далее коммутируется со скважностью 10 %). Нагреватель трубки мощностью 20 Вт успешно поддерживает +35°C при температуре в термобоксе +11°C, а далее мощности недостаточно. Желательно увеличить мощность нагревателя трубки до 30–35 Вт.

#### Заключение

Предложенная система 3D печати продуктов питания обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами: возможность печатать пищевые изделия из различных материалов: твердые расплавляемые материалы (шоколады), жидкие пасты, включая запекаемые (тесто и подобные) и замораживаемые (мороженное). Разработанная программная среда не требует для работы специальной квалификации оператора; интеграция технологии IoT позволяет применять системы удаленного мониторинга, контроля и диспетчеризации [13].

#### Библиографический список

1. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы); учебное пособие / В.А. Валетов. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. — 63 с.
2. Masbernat L., Berland S., Leverrier C., Moulin G., Michon C., Almeida G. «Structuring wheat dough using a thermomechanical process, from liquid food to 3D-printable food material», Journal of Food Engineering, vol. 310, 2020.
3. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. Учебное пособие — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: МГТУ «Станкин», 2011. — 200 с.
4. Технологии 3D-печати [электронный ресурс]. — Режим доступа: — <http://3donly.ru/articles/tehnologii-3d-pechati> (дата обращения: 10.09.2021).
5. Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев, Н.Ю. Червоннова Подход к построению систем логического управления технологическим оборудованием для реализации концепции «Индустрия 4.0» // Автоматизация в промышленности, № 5. 2017. с. 5–9.
6. Никишечкин П.А., Ковалев И.А., Григорьев А.С., Никич А.Н. Построение кроссплатформенной системы для сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования на промышленных предприятиях // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 4(14). с. 51–56.
7. Любимов А.Б., Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Построение цифровой управляющей платформы для технологического оборудования с динамически изменяющейся кинематикой // Автоматизация в промышленности, № 5. 2021. с. 3–7. DOI: 10.25728/avtprom.2021.05.01
8. Martinova L.I., Kozak N.V., Kovalev I.A. and Ljubimov A.B. Creation of CNC system's components for monitoring machine tool health. Int J AdvManufTechnol (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07107-1>
9. Martinov, G.M., Kozak, N.V. & Nikishechkin, P.A. Approach to Solving the Task of Backup on Machine Tools with CNC. Russ. Engin. Res. 40, 1024–1029 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068798X20120096>
10. Толоч А.В., Лоторевич Е.А., Пушкарёв С.А., Силантьев Д.А., Феофанов А.Н. Определение метода прототипирования для разработки офисного 3d принтера. // Технология машиностроения. 2014. № 2. С. 58–63.
11. Martinova, L., Obukhov, A. and Sokolov S. Practical Aspects of Ensuring Accuracy of Machining on CNC Machine Tools within Framework of “Smart Manufacturing”. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. Page(s): 898–902.
12. Martinov, G. and Kovalenko, A. (2020). Additive Process Equipment Control System for Integration into a Flexible Manufacturing System. In: 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE. doi:10.1109/CSCMP45713.2019.8976558

**Нежметдинов Рамиль Амирович** — д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[neramil@gmail.com](mailto:neramil@gmail.com)

**Меликов Павел Ильич** — аспирант кафедры компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[pavelmelikov@gmail.com](mailto:pavelmelikov@gmail.com)

**Ковалев Илья Александрович** — канд. техн. наук, доц. кафедры компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[i.kovalev@stankin.ru](mailto:i.kovalev@stankin.ru)

**Соколов Сергей Владимирович** — канд. техн. наук, доц. кафедры компьютерных систем управления  
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[sokolov@ncsystems.ru](mailto:sokolov@ncsystems.ru)

**Nezhmetdinov Ramil Amirovich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the sub-department «Computer systems of control» of MSUT «STANKIN»  
*neramil@gmail.com*

**Melikov Pavel Ilyich** – Postgraduate student of the sub-department «Computer systems of control» of MSUT «STANKIN»  
*pavelmelikov@gmail.com*

**Kovalev Ilya Aleksandrivich** – Associate professor of the sub-department «Computer systems of control» of MSUT «STANKIN»  
*i.kovalev@stankin.ru*

**Sokolov Sergey Vladimirovich** – Associate professor of the sub-department «Computer systems of control» of MSUT «STANKIN»  
*sokolov@ncsystems.ru*

---

---



## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УЧЕБНЫХ И ЛЮБИТЕЛЬСКИХ ПРОЕКТОВ НА БАЗЕ ARDUINO С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### QUALITY IMPROVEMENT OF EDUCATIONAL AND AMATEUR ARDUINO PROJECTS BY USING 3D-MODELLING

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с повышением уровня учебных и любительских проектов по созданию интернета вещей и объектов малой автоматизации на базе Arduino с помощью 3d-технологий моделирования и прототипирования. Обобщается опыт применения T-Flex CAD 3D и 3d-печати по нескольким проектам.*

*Some questions, related with improvement of educational and amateur projects of internet of things and small automation objects based on Arduino with help of 3d-modelling and 3d-prototyping technologies are discussed in this article. An experience of implementing T-Flex CAD 3D and 3d-printing in some projects is summarized.*

**Ключевые слова:** Трехмерное моделирование, трехмерная печать, Arduino, T-Flex CAD 3D.

**Keywords:** 3d-modelling, 3d-printing, Arduino, T-Flex CAD 3D.

В современном мире человек полностью окружен электронными устройствами (гаджетами), каждое из которых выполняет не только определенные полезные функции, но и обладает коммуникативными, а некоторые и интеллектуальными способностями. Так, смартфон может разбудить Вас утром и «подскажет» умной кофеварке, какой кофе приготовить, робот-пылесос к вашему приходу с работы уберет квартиру, а умный аквариум сам покормит рыбок. Интернет вещей уже влияет на все аспекты нашей жизни [1].

Разработка таких умных устройств (от игрушек до автоматических машин) на сегодняшний момент под силу любому школьнику и студенту, знакомому с основами электроники и программирования.

Arduino — наиболее популярная и перспективная открытая программно-аппаратная платформа для обучения техническому творчеству, созданию различных проектов умного дома и малой автоматизации [2], ставшая в своем роде неким стандартом де-факто. Любителями и энтузиастами разработаны тысячи полезных проектов на базе Arduino различной степени сложности [3, 4], которые может попробовать реализовать каждый.

Традиционно разработка проектов на базе Arduino выполняется с применением двух программ: среды проектирования электронных схем Fritzing и среды для программирования микроконтроллеров Arduino IDE. Таким образом, имея идею будущего устройства (будь то погодная станция, пожарная сигнализация и т. п.) проектировщик определяет состав электронных компонентов (датчиков, светодиодов, двигате-

лей и пр.), способ их подключения к плате Arduino, а в программе Fritzing создает модель устройства на макетной плате. Параллельно создается его электрическая принципиальная схема и, при необходимости, монтажная печатная плата (см. рис. 1). Далее, в среде Arduino IDE создается программа-скетч — прошивка микроконтроллера, которая и будет управлять реальными электронными компонентами.

К сожалению, большинство проектов на базе Arduino, приводимых в литературе [3] и интернет-источниках, ограничены только этими этапами разработки, и остаются в виде моделей на макетных платах с запутанными проводами. Лишь небольшая часть проектов реализуется в виде полноценных законченных устройств, имеющих механическую часть, заключенных в корпус или встроенных в базовую конструкцию.

Так, если проектируется миниробот, то помимо двигателей и джойстика, подключаемых к плате Arduino, необходимо разработать всю механику манипулятора, определить кинематику движения, рассчитать углы поворота и габариты зоны обслуживания, грузоподъемность манипулятора и прочность его деталей, определить способы крепления двигателей, пути прокладки кабелей и пр. Поэтому еще одной обязательной программой для разработки Arduino-проектов должна стать доступная (бесплатная) система трехмерного моделирования (CAD 3D).

Далее рассмотрим возможности и опыт применения учебной (бесплатной) версии отечественной программы T-Flex CAD [5], доступной для загрузки и освоения каждому.

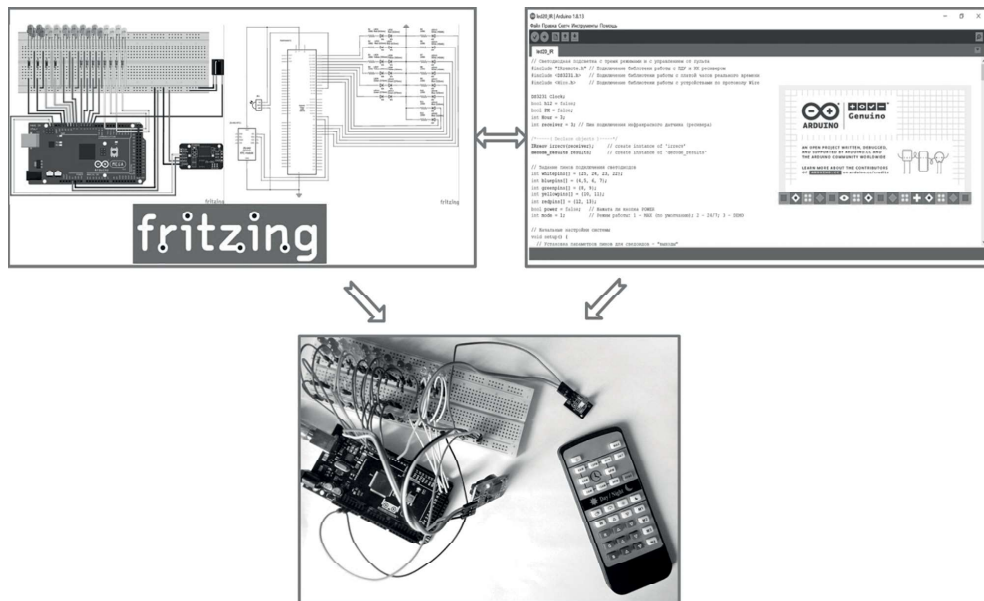


Рис. 1 – Программное обеспечение, необходимое для проектов на базе Arduino

T-Flex CAD – одна из ведущих конструкторских САПР от российских разработчиков, применяется на сотнях предприятиях и высших учебных заведениях. Программа обладает мощным функционалом и широкими возможностями. Поэтому создание механической части любого Arduino-проекта с использованием T-Flex CAD не представляет сложностей.

Однако, отсутствие базы данных электронных компонентов Arduino (плат, датчиков, двигателей и пр.) замедляет разработку таких мехатронных устройств. Поэтому, в первую очередь, необходимо было создать такую базу данных, которая бы охватывала наиболее часто применяемые компоненты (платы Arduino Uno и Mega и некоторые платы расширения, серводвигатели, дисплеи, датчики, разъемы и соединения и пр.) – см. рис. 2. Наполнение базы данных трехмерными моделями компонентов может быть выполнено в краткий срок, с помощью импорта 3d-моделей из открытых источников [6].

Рассмотрим один из учебных проектов - солнечный трекер – устройство предназначенное для слежения за солнцем, для повышения эффективности работы солнечной панели. Подобные проекты очень актуальны и популярны среди любителей Arduino. На рис. 3 показана 3d-модель трекера, созданная в T-Flex CAD.

Устройство планировалось изготавливать в единичном экземпляре из подручных средств (фанерок, планок и пр.), поэтому конструкция выполнена максимально простой и функциональной. Основной проблемой при создании модели устройства в T-Flex CAD явилась необходимость создания большого числа коммуникаций – электрических проводов, буквально опутывающих всю модель. Модель трекера

была полностью реализована и успешно протестирована в рамках учебного проекта.

Ещё большие возможности и преимущества от 3d-технологий можно получить, если совместно с трехмерным моделированием применять трехмерную печать. Современные бытовые и дешевые 3d-принтеры давно вошли в нашу жизнь и сейчас позволяют быстро получать пластиковые изделия высокой сложности, ограниченные лишь габаритами печати принтера. При этом для подготовки управляющих программ для 3d-принтера также используется бесплатное программное обеспечение Ultimaker Cura [7].

Применение 3d-печати упрощает производство готового изделия, т.к. не нужно разрабатывать технологии изготовления отдельных деталей (лазерного раскроя, гибки, штамповки, сверления и пр.), иметь соответствующее оборудование и т.п. Единственное ограничение – пластик в качестве материала (технологии 3d-печати деталей из металла не рассматриваются, т.к. для учебных и любительских проектов слишком дороги в настоящее время).

Рассмотрим еще несколько учебных проектов, в которых полностью использованы преимущества 3d-технологий – трехмерное моделирование в T-Flex CAD и трехмерная печать.

На рис. 4 показана оригинальная модель пульта управления мини-роботом MeArm [8]. Для управления серводвигателями используются четыре потенциометра, три кнопки отвечают за включение различных режимов управления (ручного, обучения и автоматического), текущее положение координат серводвигателей и другая служебная информация отображается на LCD дисплее. Корпус пульта, состоящий из двух

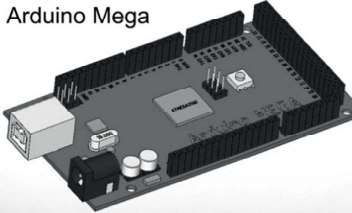

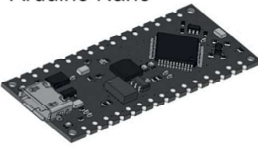
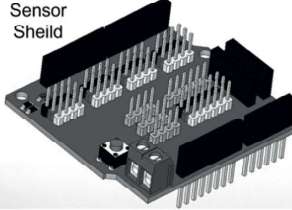
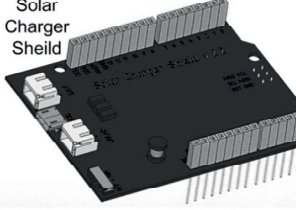
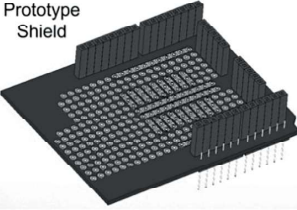
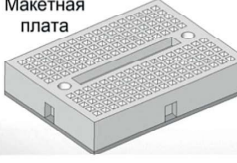


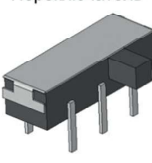
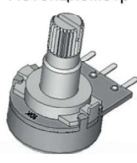


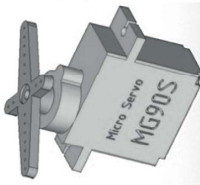





Основные платы Arduino	 <p>Arduino Mega</p>	 <p>Arduino Uno</p>	 <p>Arduino Nano</p>		
Платы расширения	 <p>Sensor Shield</p>	 <p>Solar Charger Shield</p>	 <p>Prototype Shield</p>		
Базовые электронные компоненты	 <p>Макетная плата</p>	 <p>LED</p>	 <p>Фоторезистор</p>	 <p>Переключатель</p>	 <p>Потенциометр</p>
Датчики, двигатели	 <p>Ультразвуковой датчик</p>	 <p>Инфракрасный датчик</p>	 <p>Серводвигатель</p>	 <p>Шаговый двигатель</p>	
Прочие компоненты	 <p>LCD-дисплей</p>	 <p>Модуль I2C</p>	 <p>Контроллера заряда Li-Ion батарей</p>	 <p>Индикатор заряда</p>	

Рис. 2 – Фрагмент базы данных 3d-моделей T-Flex CAD электронных компонентов Arduino

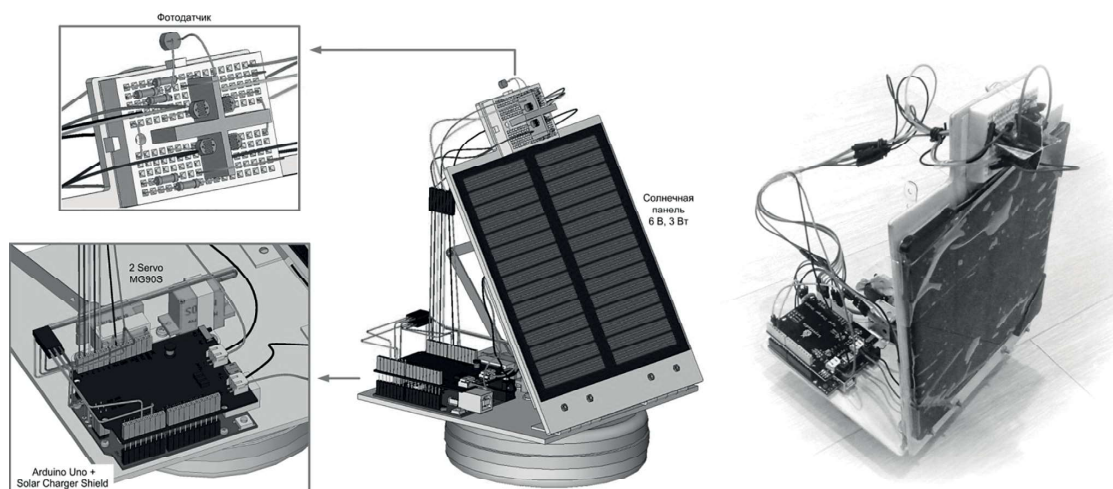


Рис. 3 – Солнечный трекер (модель T-Flex CAD 3D и реальное устройство)



Рис. 4 – Пульт миниробота-манипулятора (модель T-Flex CAD 3D и реальное устройство)

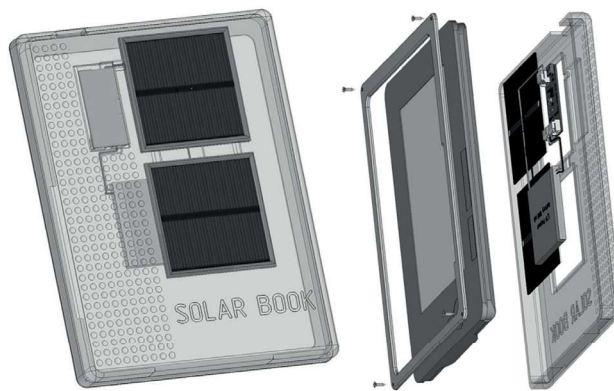


Рис. 5 – Проект Solarbook (модель T-Flex CAD 3D)

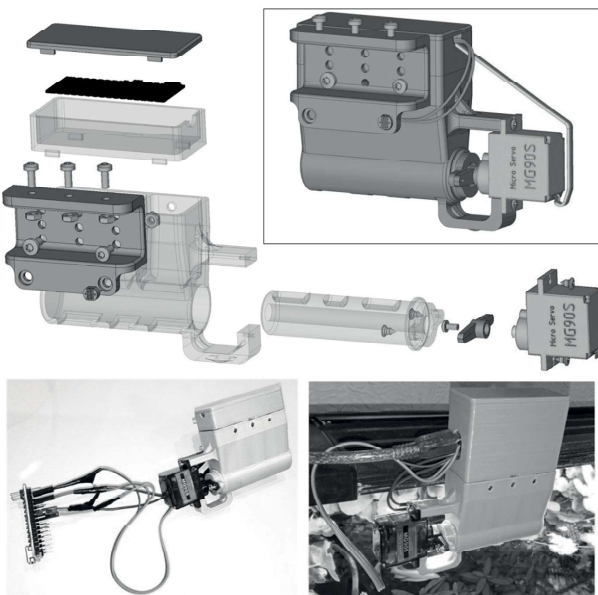


Рис. 6 – Автоматическая кормушка для рыб (модель T-Flex CAD 3D и реальное устройство)

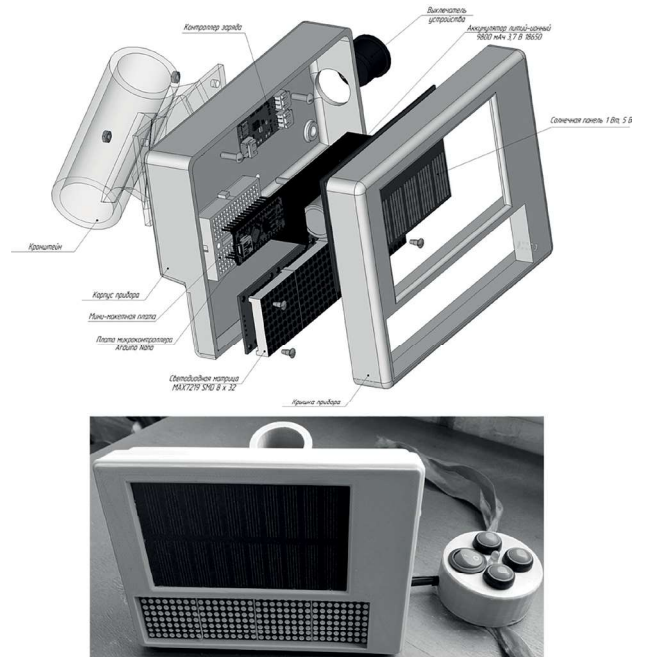


Рис. 7 – Устройство заднего освещения с функциями поворотников для велосипеда (модель T-Flex CAD 3D и реальное устройство)

деталей, заключающих в себя все электронные компоненты, был распечатан на 3D-принтере.

Следующий проект посвящен модернизации электронной книги за счет добавления в нее солнечного зарядного устройства, состоящего из двух солнечных панелей, контроллера заряда и литий-ионного аккумулятора (см. рис. 5). Детали корпуса также были распечатаны на бытовом 3D-принтере.

Еще один проект, в котором большая роль отведена именно трехмерному моделированию деталей, нежели проектированию электронной схемы и программированию, — автоматическая кормушка для рыб (см. рис. 6). Электронными компонентами проекта являются лишь серводвигатель MG90S, фоторезистор и плата Arduino Nano. Механическая часть состоит из пяти деталей, распечатанных на 3D-принтере: корпус кормушки (бункер), ротор, корпус для платы Arduino, крышка и кронштейн для крепления устройства.

Последний студенческий проект, уровень проектирования в котором выше всех рассмотренных — устройство заднего освещения для велосипеда с функциями поворотников (см. рис. 7). Устройство реализовано на плате Arduino Nano, светодиодной матрицы 8x32 и оснащено солнечным зарядным устройством. Пульт устройства выполнен в отдельном корпусе.

В заключении хотелось бы выразить очевидную мысль, о том, что любой проект на базе Arduino не должен заканчиваться набором правильно соединенных электронных компонентов на макетной плате и отлаженной программой-прошивкой микроконтроллера, но обязательно полноценным собранным устройством. При этом в курсе обучения программируемой электронике на базе Arduino нужно обязательно включать изучение основ трехмерного моделирования, а трехмерная печать должна стать неотъемлемой частью такого образовательного и производственного процесса.

## Библиографический список

1. **Рогачева Н.В.** Интернет вещей: обзор применений в настоящем и будущем / Н.В. Рогачева // Язык в сфере профессиональной коммуникации : сборник материалов международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и студентов (Екатеринбург, 28 мая 2020 г.). — Екатеринбург : ООО «Издательский Дом «Ажур», 2020. — С. 621–626.
2. **Закаложный А.А.** Функциональные возможности и перспективы развития платформы Arduino. В сборнике: Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие». Март 2018. Сборник избранных статей Международной научной конференции, Международной научно-методической конференции, Международной студенческой научной конференции. 2018. С. 8–12.
3. **Петин В.А.** Arduino и Raspberry Pi в проектах Internet of Things. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016. — 320 с.: ил. — (Электроника)
4. Arduino Project Hub [Electronic resource] // Arduino Project Hub: [site]. — 2020. — URL: <https://create.arduino.cc/> (Дата обращения: 25.09.2021)
5. T-FLEX CAD — система для конструкторской подготовки и 3D-моделирования [Электронный ресурс] // T-FLEX CAD [site] — 2020. URL: <https://www.tfex.ru/products/konstruktor/cad3d/> (Дата обращения: 25.09.2021)
6. The largest online community of professional designers, engineers, manufacturers, and students [Electronic resource] // GrabCAD Community [site] — 2021. URL: <https://grabcad.com/> (Дата обращения: 25.09.2021)
7. 3D printing software for a powerful production [Electronic resource] // Ultimaker [site] — 2021. URL: <https://ultimaker.com/software> (Дата обращения: 25.09.2021)
8. **Benjamin Gray.** MeArm Robot Arm — Your Robot — V1.0 [Electronic resource] // Arduino Project Hub: [site]. — 2016. — URL: — <https://create.arduino.cc> (Дата обращения: 25.09.2021)

**Махов Александр Александрович** — канд. техн. наук, доц. кафедры технологий автоматизированного производства Егорьевского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*makhov.alex1979@yandex.ru*

**Makhov Alexander Alexandrovich** — candidate Sc. Of Engineering, docent of sub-department «Technology of automated manufacturing» of ETI (branch) MSUT «STANKIN»  
*makhov.alex1979@yandex.ru*

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ****ENERGY ANALYSIS AND ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS  
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MECHANICAL  
PROCESSING**

*Проведен энергетический анализ технологического процесса механообработки и показаны возможности использования его результатов для создания единой методики снижения потребления энергии при реализации этих процессов и для оценки их экологичности при каждой конкретной реализации.*

*The energy analysis of the technological process of mechanical processing is carried out and the possibilities of using its results to create a unified methodology for reducing energy consumption during the implementation of these processes and to assess their environmental friendliness for each specific implementation are shown.*

**Ключевые слова:** механообработка, технологический процесс, реализация, энергетический анализ, экологичность, интегральная оценка.

**Keywords:** mechanical processing, technological process, implementation, energy analysis, environmental friendliness, integrated assessment.

**Введение**

Технологические процессы механообработки являются одними из наиболее распространенных технологических процессов в различных отраслях промышленности и занимают ведущее место в экономической деятельности человека, а их эффективность в значительной мере определяет экономический потенциал любой страны, определяет конкурентоспособность продукции машиностроения. При этом они отличаются широким многообразием как самих процессов, так и условиями их реализации [1, 2]. Это относится к внедрению и разработке современных инновационных технологий механической обработки, к построению «умных» технологий и реализации концепции «Индустрия 4.0» в части технологий обработки, а также и к другим инновациям. Важным фактором, обеспечивающим повышение качества и эффективности технологических процессов механообработки, является также формирование технологий

механообработки в качестве наилучших доступных технологий [3]. Эти особенности создают существенные трудности при разработке единой методики анализа технологических процессов механообработки и единой методики повышения показателей их качества. Эти трудности могут быть преодолены на основе энергетического представления и анализа технологических процессов [4, 5].

**1. Энергетическое представление процессов преобразования и передачи энергии**

При энергетическом представлении технологический процесс механообработки представляется в виде двух процессов — процесса преобразования в подавляющем большинстве случаев электрической энергии в механическую энергию и процесса передачи механической энергии в зону обработки. Первый процесс осуществляется посредством электротехнических систем станка, а второй — его кинематики (рис. 1).



Рис. 1 — Энергетическое представление технологического процесса

Этому энергетическому представлению технологического процесса соответствует энергетическая диаграмма, изображенная на рисунке 2.

$P_{рез}$  — мощность резания,  $\Delta P_1$  — потери в зоне резания,  $\Delta P_2$  — потери при передаче механической энергии,  $\Delta P_3$  — потери при преобразовании электрической энергии в механическую,  $P_1, P_2, P_3$  — активная составляющая потребляемой мощности соответственно при передаче и преобразовании энергии,  $Q$  — реактивная составляющая потребляемой мощности,  $S$  — потребляемая мощность.

Процессы преобразования и передачи активной составляющей потребляемой мощности в зону резания сопровождаются потерями энергии  $\Delta P$  на всех этапах преобразования и передачи энергии и определяют увеличение, и часто существенное, активной составляющей потребляемой мощности  $P_3$ , а значит и увеличение потребляемой мощности  $S$ .

Для станков, электротехнические системы которых представляют собой системы переменного тока, характерным является также наличие реактивной составляющей потребляемой мощности  $Q$ . Наличие этой составляющей существенно увеличивает потребляемую при реализации технологических процессов мощность  $S$ .

Реактивная составляющая потребляемой мощности возникает из-за характерной для процессов механообработки «недогрузки» станков, когда мощность на валу электродвигателя меньше его номинальной мощности. В этом случае коэффициент мощности существенно уменьшается, а фазный угол между напряжением и потребляемым при реализации технологического процесса током увеличивается [1].

Реактивная составляющей потребляемой мощности обусловлена наличием реактивной составляющей потребляемого тока, и ее наличие физически означает увеличение потребляемого тока при реализации технологического процесса механообработки относительно его требуемого значения.



Рис. 2 — Энергетическая диаграмма технологического процесса

Рассмотрим активную составляющую потребляемой мощности и ее компоненты более подробно.

На всех этапах преобразования и передачи активной составляющей потребляемой мощности возникают потери  $\Delta P_i$ . Эти потери связаны с рядом причин. Так, например, потери при преобразовании электрической энергии в механическую  $\Delta P_3$  связаны с замыканием магнитного потока в воздухе и с потерями на вихревые токи. Потери при передаче механической энергии в зону обработки обусловлены, в первую очередь, потерями на преодоление трения в кинематической цепи станка и в системе «инструмент-заготовка», а также с погрешностями изготовления и сборки элементов кинематической цепи (валов, зубчатых шестерен и др. элементов).

В этом случае, баланс активной составляющей потребляемой мощности при реализации технологических процессов механообработки определяется выражением,

$$P_3 = P_{рез} + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3, \quad (1)$$

а полный энергетический баланс технологического процесса при его конкретной реализации в соответствии с энергетической диаграммой определится выражением:

$$S = \frac{P_{рез} + \sum_{i=1}^3 \Delta P_i}{\cos \varphi}. \quad (2)$$

Баланс активной составляющей и полный энергетический баланс характеризуют экологичность технологических процессов при каждой их конкретной реализации.

## 2. Формирование интегрального экологического показателя качества технологических процессов

Действительно, потери  $\Delta P_1$  обусловлены в первую очередь наличием трения в системе «инструмент — заготовка». Эти потери имеют переменные значения, так как они отражают в прежде всего колебания припуска заготовки и ее биения при закреплении в шпиндель технологического оборудования, а значит определяют вибрации и связанный с ними шум в зоне обработки. Кроме того, эти потери вызывают нагрев, т. е. тепловые отходы в системе «инструмент-заготовка». Для снижения этой температуры реализация технологического процесса осуществляется с применением жидких СОТС. Однако жидкие СОТС, попадая в зону высоких температур, разлагаются на компоненты (термодеструкция жидких СОТС), загрязняя воздух рабочей зоны продуктами термодеструкции. Таким образом, в зоне обработки потери механической энергии вызывают вибрации и связанный с ними шум, образование взвесей-примесей, формирование тепловых отходов (за счет перехода механической энергии в тепловую) и загрязнение воздуха рабочей зоны продукцией термодеструкции жидких СОТС (переход тепловой энергии в химическую).

При передаче механической энергии от вала двигателя в зону обработки возникают потери  $\Delta P_2$ . Эти потери обусловлены потерями энергии в кинематической цепи станка. Они связаны с потерями на трение и с потерями, обусловленными погрешностями изготовления и сборки кинематических цепей. Эти потери вызывают износ элементов кинематической цепи и как следствие этого образование взвесей-примесей (твердые отходы). При этом возникают вибрационные, шумовые и тепловые отходы.

Несмотря на тенденцию сокращения протяженности кинематических цепей станка и передачи её функций системам управления, значение этих цепей в энергетическом анализе и воздействии на окружающую среду и человека остается существенным.

Потери  $\Delta P_3$  вызывают нагрев проводов и нагрев сердечника, т. е. создают тепловые отходы, а магнитный поток, замыкающийся через воздух, вместе с магнитным потоком, создаваемым током, протекающим по проводам, создают электромагнитные отходы.

Таким образом, потери активной составляющей потребляемой мощности формируют негативное воздействие на окружающую среду и человека через тепловые, вибрационные, шумовые отходы, через образование взвесей-примесей, загрязняющих воздух рабочей зоны, масла и жидкие СОТС, загрязняют воздух рабочей зоны продуктами термодеструкции жидких СОТС при реализации технологических процессов механообработки.

Значение потребляемой при реализации технологических процессов механообработки энергии характеризуется не активной составляющей потребляемой мощности  $P_3$ , а полной мощностью  $S$ , в большинстве случаев существенно превышающей ее активную составляющую  $P_3$ .

Это объясняется тем, что электротехническая система станка представляет собой RL нагрузку, а значит и требует наличия реактивной составляющей  $Q$  потребляемой мощности. Физически наличие этой составляющей означает, что реализация технологических процессов происходит при токах, превышающих (и часто значительно) токи, необходимые для реализации технологических процессов. Эта составляющая в полном энергетическом балансе отражается коэффициентом мощности  $\cos\phi$ , значение которого существенно уменьшается при характерной для реализации технологических процессов механообработки «недогрузке» двигателя (режим, при котором мощность на валу электродвигателя меньше его номинальной мощности).

Действительно, в большинстве случаев из-за разнообразия технологических процессов (чистовая или черновая обработка, режимы резания и др. факторы, определяющие мощность резания), мощности технологических переходов, приведенных к валу электродвигателя, значительно ниже номинальной мощности электродвигателя. Это обстоятельство усугубляется

наличием холостых ходов, связанных с подачей, отводом и сменой инструмента, изменением режимов обработки и т. д.

Недогрузка электродвигателя вызывает значительное увеличение фазового угла, а значит и снижение коэффициента мощности и увеличение как потребляемой мощности, так и ее реактивной составляющей. Увеличение потребляемой мощности при реализации технологических процессов имеет важнейшее значение с точки зрения уменьшения воздействия этих процессов на окружающую среду и человека, так как высокая энергоемкость технологических процессов приводит к неэффективному использованию источников электрической энергии и к существенному загрязнению окружающей среды отходами, характерными для энергетической промышленности.

Энергетический анализ технологических процессов механообработки позволил сформировать подходы к снижению потребления энергии при реализации технологических процессов, а значит, и к формированию подходов к повышению их экологичности. Под разработкой энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий (снижение  $P_{рез}$ ) подразумевается создание технологических процессов, которые минимизируют потребление энергии и сырья при их реализации посредством формирования оптимальных характеристик с применением специального инструмента, средств автоматизации и других инновационных технологий.

Снижение потерь энергии при ее преобразовании и передаче в зону резания (снижение  $\Delta P_1$ ) обеспечивается за счет усовершенствования конструкции оборудования для реализации технологических процессов механообработки и может быть реализовано как в неавтоматическом, так и в автоматическом режимах.

Адаптация оборудования для реализации технологических процессов механообработки подразумевает, в первую очередь, подбор мощности электродвигателя технологического оборудования, соответствующей реальной мощности технологических процессов механообработки, недопущение применения оборудования, номинальная мощность электродвигателя которого существенно превышает мощность технологического процесса.

Компенсация реактивной составляющей потребляемого тока подразумевает снижение реактивной составляющей потребляемой мощности машиностроительного предприятия посредством компенсационных устройств, работающих как в автоматическом, так и в неавтоматическом режимах. Этот метод реализуется посредством повышения коэффициента мощности электротехнических систем технологического оборудования [5].

Реализация этих подходов к снижению потребления энергии при реализации технологических процессов механообработки достаточно подробно описа-



на в технической литературе. Однако энергетический анализ позволяет не только сформулировать подходы к снижению потребления энергии при реализации технологических процессов механообработки, но и провести численную оценку их экологичности и комплексного воздействия этих процессов на окружающую среду и человека при каждой конкретной реализации [6].

Эту численную оценку можно осуществить на основе сопоставления мощности резания и потребляемой мощности ( $S$ ) при реализации технологического процесса механообработки. Это отношение через потери активной составляющей потребляемой мощности  $\Delta P_i$  и наличие реактивной составляющей потребляемого тока через  $\cos\varphi$  определяет завышенное потребление энергии, характеризуемое величиной потребляемой мощности  $S$ . При этом следует иметь в виду, что в случае, если потери активной составляющей потребляемой мощности отсутствуют ( $\Delta P_i = 0$ ) и реактивная составляющая потребляемого тока также отсутствует ( $\cos\varphi = 1$ ), то экологичность технологического процесса механообработки имеет максимальное значение, которое равно 1.

В том же случае, если  $\Delta P_i$  велико, а  $\cos\varphi$  мал, т. е., потребляемая мощность больше мощности, необходимой для реализации технологического процесса, то экологичность этого процесса мала. Это отношение можно назвать «Интегральный экологический показатель технологического процесса» —  $I$

Таким образом, интегральный показатель ( $I$ ) меняется для каждой реализации технологического процесса от 0 до 1. Чем в большей степени экологичен технологический процесс механообработки (чем меньше воздействия этого процесса на ОС и человека), тем в большей степени интегральный экологический показатель приближается к 1. Для численной оценки экологичности технологического процесса необходимо, как указывалось выше, сопоставить две величины —  $P_{рез}$  и  $S$ .  $P_{рез}$  представляет собой величину, рассчитанную технологом при разработке технологического процесса. Величина  $S$  определяется в результате измерения тока и напряжения, при которых этот процесс реализуется. Их произведение определяет полную потребляемую мощность при каждой конкретной реализации технологического процесса механообработки.

Таким образом, интегральный экологический показатель позволяет определить численное значение экологичности технологического процесса при каждой его конкретной реализации. Кроме того, знание этой величины позволит сопоставить по экологичности различные технологические процессы, реализуемые на различном оборудовании и при разных условиях, а также стать обоснованием для отнесения технологического процесса к категории наилучших доступных технологий механообработки [1].

Достоверность методики численной оценки экологичности технологических процессов механообработки посредством интегрального экологического показателя была проверена экспериментально. Она проверялась посредством экспериментального сопоставления величин изменения потребления энергии и изменения характерного для технологических процессов механообработки экологического показателя — вибрационные отходы.

Исследования проводились на специальном стенде, изолированном от посторонних вибраций и снабженным системой искусственной ввода вибраций. Один из результатов экспериментальных исследований представлен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

№ п.п.	Вибрация, дБ	Потребляемый ток, А	Приращение вибраций, %	Приращение тока, %
1	125,8	1,27	10,9	10,4
2	115,0	1,22		

Величина вибраций задавалась искусственно и ее приращение составило 10,9 %. Величина потребляемой мощности определялась посредством измерения величины потребляемого тока при напряжении 220 В и последующем перемножении этих величин. Приращение потребляемой мощности составило 10,4 %. Как следует из таблицы 1, приращение экологического показателя соответствует приращению потребляемой мощности, а значит и изменению интегрального экологического показателя. Кроме того, экспериментально в производственных условиях было проведено сопоставление двух технологических процессов — процесса точения и процесса сверления. Результаты исследований представлены в табл. 2

Таблица 2. Результаты сравнения характеристик технологических процессов точения и сверления

№ п.п.	Технологический процесс	Мощность технологического процесса ( $P_{рез}$ ), кВт	Потребляемая мощность ( $S$ ), кВА	Интегральный экологический показатель ( $I$ )
1	Точение	1,50	6,05	0,25
2	Сверление	1,35	3,66	0,36

При экспериментальных исследованиях была рассчитана мощность, необходимая для реализации каждого из технологических процессов ( $P_{рез}$ ) и измерена мощность, потребляемая при реализации этих процессов (S). По этим данным был вычислен интегральный экологический показатель качества этих двух технологических процессов.

#### Выводы

Как показали исследование, комплексное воздействие технологического процесса сверления на окружающую среду в 1,44 раз меньше, чем воздействие технологического процесса точения. При этом следует добавить, что компенсация сдвига фаз не только увеличивает интегральный экологический показатель качества машиностроительных технологических процессов механообработки, но и снижает величину потребляемого при реализации этих процессов токов, что обеспечивает дополнительную безопасность реализуемого технологического процесса.

#### Библиографический список

1. **Н.А. Иванова, С.А. Рябов, Л.Э. Шварцбург, Заборовский Т.** Формирование наилучших доступных технологий механической обработки на основе энергоэффективности. СТИН 7, 2019, С. 35–38
2. **Шварцбург Л.Э.** Экоэнергетика технологических процессов резанья. // Экология и промышленность России. 2015. — №3, С. 4–9
3. **Григорьев С.Н.** Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2010 № 3. С. 7–13
4. **Шварцбург Л.Э., Иванова Н.А., Кулизаде Д.И.** и др. Исследование параметров вибрации при реализации технологических процессов механической обработки. СТИН. 9-2020, С. 37–40
5. **Гвоздкова С.И., Шварцбург Л.Э.** Минимизация потерь энергии путем увеличения коэффициента мощности // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 2 (20). С. 32–36.
6. **T. Zaborowski, L. Shvartsburg, N. Ivanova, S. Ryabov.** Ecoenergeticscuttingtechniques//Management and Production Engineering Review. 2018. Vol. 9 (Number 4). P. 70–75

**Шварцбург Леонид Эфраимович** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
lesh@stankin.ru

**Иванова Наталья Александровна** — канд. техн. наук, доц. кафедры инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
ivanova\_na2006@mail.ru

**Рябов Сергей Александрович** — канд. техн. наук, доц. кафедры инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
zarr05@mail.ru

**Кулизаде Дмитрий Игорьевич** — аспирант кафедры инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
89157661208@mail.ru

**Shvartsburg L.E.** — Doctor of technical sciences, professor, head of department «Engineering Ecology and Life» of MSUT «STANKIN»  
lesh@stankin.ru

**Ivanova N.A.** — candidate of Sc. in engineering, sub-department of «Engineering ecology and life safety» of MSUT «STANKIN»  
ivanova\_na2006@mail.ru

**Ryabov S.A.** — candidate of Sc. in engineering, sub-department of «Engineering ecology and life safety» of MSUT «STANKIN»  
zarr05@mail.ru

**Kulizade D.I.** — graduate student, sub-department of «Engineering ecology and life safety» of MSUT «STANKIN»  
89157661208@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ЛИТЬЯ С ОПРЕССОВКОЙ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГОСЯ МЕТАЛЛА ДАВЛЕНИЕМ

## INVESTIGATION OF UNSTEADY THERMAL PROCESSES IN CASTING CONDITIONS WITH PRESSURE TESTING OF CRYSTALLIZING METAL

*В работе представлены результаты математического и компьютерного моделирования процесса литья с кристаллизацией под давлением. Установлено, что одним из условий достижения высокой прочности заготовок в условиях кристаллизации под давлением является управление формированием температурных полей в окрестностях камеры прессования на этапе компенсации усадки металла.*

*Разработан экспериментально-аналитический метод, сущность которого заключается в том, что температурное поле в отливке рассчитывается с учетом распределения температур в стенке формы. Рассчитана скорость кристаллизации. Установлены зависимости распределения температурных полей в форме и отливке.*

*Предлагается результаты моделирования использовать для формирования управляющих воздействий на исполнительные устройства технологического оборудования, которое обеспечит запрессовку требуемого объема металла с учетом фактической температуры расплава.*

*The paper presents the results of mathematical and computer modeling of the casting process with crystallization under pressure. It has been established that one of the conditions for achieving high strength of workpieces under pressure crystallization conditions is to control the formation of temperature fields in the vicinity of the pressing chamber at the stage of compensating for metal shrinkage.*

*An experimental-analytical method has been developed, the essence of which is that the temperature field in the casting is calculated taking into account the temperature distribution in the mold wall. The crystallization rate is calculated. The dependences of the distribution of temperature fields in the mold and casting have been established.*

*It is proposed to use the simulation results for the formation of control actions on the actuators of technological equipment, which will ensure the pressing of the required volume of metal, taking into account the actual temperature of the melt.*

**Ключевые слова:** кристаллизация под давлением, опрессовка, математическое и компьютерное моделирование, управление, экспериментально-аналитический метод, температурные поля, распределение температуры.

**Keywords:** crystallization under pressure, pressure testing, mathematical and computer modeling, control, experimental-analytical method, temperature fields, temperature distribution.

### Введение

На сегодняшний день преимущества использования методов математического и компьютерного моделирования в технологических процессах литья с кристаллизацией под давлением очевидны. В первую очередь это касается оптимизации проектирования; сокращения затрат на отработку технологии; повышения качества выпускаемой продукции; уменьшения эксплуатационных расходов и т.д. Математическое моделирование оказывает существенное влияние на характер научных исследований, устанавливая новые формы взаимосвязи между экспериментальными и математическими методами.

В свою очередь, применение математического моделирования в литейной промышленности привело к появлению большого числа соответствующего программного обеспечения, с помощью которого более или менее успешно решаются задачи, с которыми специалисты в области литья сталкиваются в практической работе.

В основе математической модели литейных процессов лежат уравнения тепломассопереноса: уравнения теплопроводности, Навье-Стокса, диффузии, кинетические уравнения фазовых превращений и т.д. Расчетная область включает не только объем, занимаемый расплавом, но также и формообразующую среду

с различными граничными и начальными условиями.

Программы для моделирования литейных процессов, распространенные в настоящее время, в основном различаются степенью полноты учитываемых при моделировании факторов, методами получения и решения разностных уравнений: уравнения тепло-массопереноса могут быть записаны в дифференциальном или интегральном виде [1].

**Основная часть**

В представленной работе за основу взят процесс производства заготовок поршней ДВС для последующей изотермической штамповки на горизонтальном гидравлическом прессе методом литья с кристаллизацией под давлением [2]. Из описания процесса следует, что одним из условий достижения высокой прочности заготовок поршней является контроль, а в перспективе и целенаправленное формирование температурных полей в окрестности камеры прессования на этапе компенсации усадки металла, а также на последующих стадиях перевода системы в конечное состояние.

До настоящего времени в литейном производстве подобные задачи не решались. Системы автоматизированного проектирования литейных процессов, в первую очередь, связаны с созданием геометрических 3D – моделей отливок. Находит применение, к примеру, программа «SolidWorks» с разбивкой модели на конечные элементы «HyperMesh», программный продукт «Полигон» с возможностью расчетов температурных параметров и усадочных дефектов, хорошо известны такие программы, как Magma, WinCast (Германия), американские ProCAST и SolidCast (США), CastCAE (Финляндия) и др. [3].

С учетом того, что тепловые процессы в процессе кристаллизации имеют отчетливо выраженный

нестационарный характер, использование в качестве основного дифференциального уравнения теплопроводности для построения расчетных имитационных моделей представляется не целесообразным.

Для управления изменением состояния металлической системы по определенному закону необходимы количественные оценки, в то время как результаты моделирования, которые сегодня имеются в распоряжении специалистов, фактически не сопоставлены с экспериментальными данными; адекватность разработанных моделей не доказана.

Наши исследования были направлены на разработку экспериментально-аналитического метода [4–6], сущность которого состоит в том, что температурное поле в отливке рассчитывается с учетом распределения температур в стенке формы. Измерения температур в стенке формы могут быть выполнены с достаточно высокой точностью. Эти измерения используются для расчета удельного теплового потока на границе металл-форма, а зависимость удельного теплового потока от времени представляет собой ни что иное как описание граничных условий, необходимое для решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Распределение температуры в стенке отливки рассчитано на основе реальных данных о распределении температуры в форме, полученных с помощью термпар, вмонтированных в стенку пресс-формы в фиксированных точках [7]. С учетом того, что давление, накладываемое на жидкий металл, может достигать уровня 400 МПа, а в некоторых случаях и 500 МПа, термическим сопротивлением на границе металл – форма пренебрегали. Расчетная схема приведена на рис. 1.

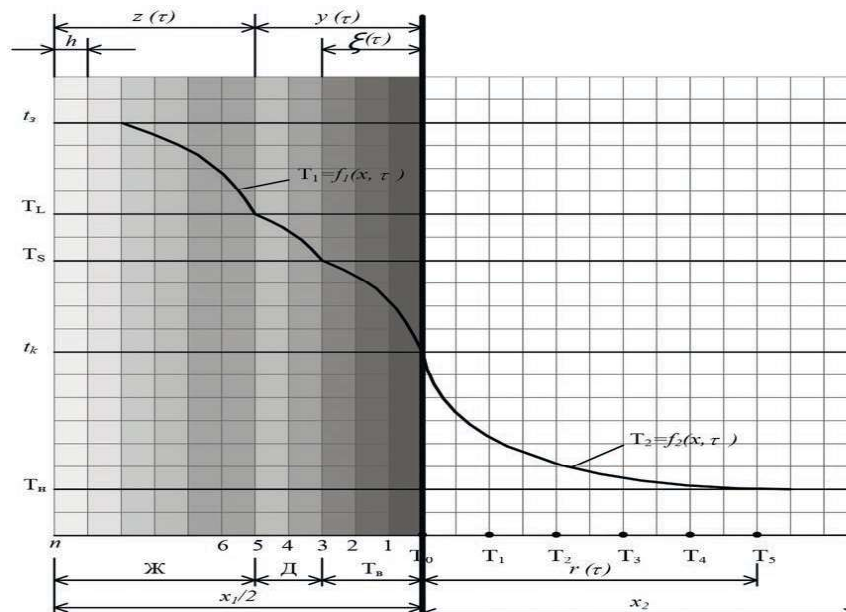


Рис. 1 – Распределение температурных полей в форме и отливке

Если количество теплоты, аккумулированной формой за время  $\tau$ , обозначить  $Q$ , то формула для расчета величины удельного теплового потока на границе отливка-форма принимает вид:

$$q = \frac{Q}{\tau} \quad (1)$$

Зависимость  $q(\tau)$  в дальнейшем используется как математическое описание граничных условий дифференциального уравнения теплопроводности.

С другой стороны, тепловой поток на выходе из отливки можно определить так:

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} = \lambda \frac{\Delta t}{h} = \lambda \frac{t_i - t_{i-1}}{h} \quad (2)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $x$  — координата;  $h$  — шаг сетки;  $t$  — время;  $t_i$  — время выделения скрытой теплоты кристаллизации. Отсюда получаем формулу для расчёта температуры в точке  $x_{1,i}$ ,

$$\Delta t_1 = \frac{q_1 h}{\lambda} \quad (3)$$

Для расчета  $q$  из вновь найденного на данный момент времени общего количества теплоты  $Q$  необходимо вычесть количество теплоты  $Q_{omd}^1$ , отданное в форму предыдущим слоем  $h$ .

$$Q_{omd}^1 = (Q^{тв} + Q^{акк} + Q^*) h F = \left( \frac{1}{2} c^{тв} \rho^{тв} (t_1^1 - t_k) + c^{тв} \rho^{тв} (t_s - t_1^1) + c^{лв} \rho^{лв} (t_L - t_s) + L \rho^{лв} \psi + c^* \rho^* (t_3 - t_L) \right) h F, \quad (4)$$

где  $Q^{тв}$  — количество теплоты твердой фазы;  $Q^{акк}$  — количество теплоты аккумулированное формой;

$Q^*$  — количество теплоты жидкой фазы;  $c^{тв}$  — теплоемкость твердой части отливки;  $\rho^{тв}$  — плотность твердой части отливки;  $c^л$  — теплоемкость двухфазной зоны;  $\rho^л$  — плотность двухфазной зоны;  $c^*$  — теплоемкость жидкой зоны;  $\rho^*$  — плотность жидкой зоны;  $t_L$  — температура ликвидуса;  $t_s$  — температура солидуса;  $t_1^1$  — температура в точке  $x_j$ ;  $\psi$  — концентрация твердого металла в двухфазной зоне, принято  $\psi = 0,7$ ;  $h$  — шаг сетки;  $F$  — поверхность, через которую распространяется тепловой поток,  $F = 1 \text{ м}^2$ .

Значение  $q_2$  на границе первого и второго слоя:

$$q_2 = \frac{Q - Q_{omd}^1}{\tau} \quad (5)$$

Для исследования выбран алюминиевый сплав В95. Материал формы — штамповая сталь 4Х5МФС. Теплофизические свойства материалов заимствованы из литературных источников [8] и приведены в табл. 1.

Используя формулу (4), можно определить температуру в точке 1 в соответствии с рис. 1.

Корректируя количество теплоты по формуле (5), рассчитывают новое значение  $q$  на границе первого и второго слоя по формуле (6):

$$t_1^1 = t_k + \Delta t_1 \quad (6)$$

Расчеты температур в следующих точках необходимо продолжать, пока не будет выполнено условие:  $t_i \geq t_3$ .

В следующий момент  $\tau_2$  снимаются новые показания термомпар в точках 1, 2, 3, 4, 5 (см. рис. 1). Строится зависимость  $t_2(x)$ , определяется  $t_2^{cp}$ , далее рассчитываются  $Q_{акк}^2$ ,  $q$  и т. д.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов — алюминиевый сплав В95

Свойства	В95
$c^{тв}$ — теплоемкость твердой части отливки, Дж/кг·К	1050
$\rho^{тв}$ — плотность твердой части отливки, кг/м <sup>3</sup>	2750
$c^{лв}$ — теплоемкость двухфазной зоны, Дж/кг·К	1250
$\rho^{лв}$ — плотность двухфазной зоны, кг/м <sup>3</sup>	2552
$c^*$ — теплоемкость жидкой зоны, Дж/кг·К	1100
$\rho^*$ — плотность жидкой зоны, кг/м <sup>3</sup>	2452
$c_2$ — теплоемкость формы, Дж/кг·К	470
$\rho_2$ — плотность формы, кг/м <sup>3</sup>	7800
$L$ — скрытая теплота кристаллизации, кДж/кг	400
$t_L$ — температура ликвидуса, °С	645
$t_s$ — температура солидуса, °С	570
$t_\phi$ — температура формы, °С	300
$t_3$ — температура заливаемого металла, °С	850
$\lambda$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	160



Рис. 2 – Распределение температуры

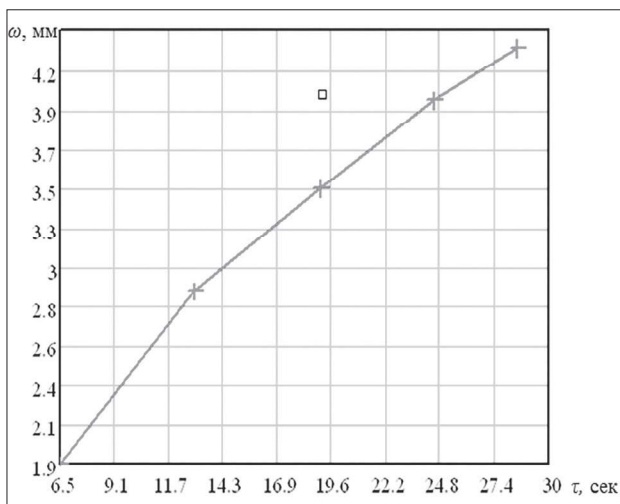


Рис. 3 – Изменение положения фронта затвердевания

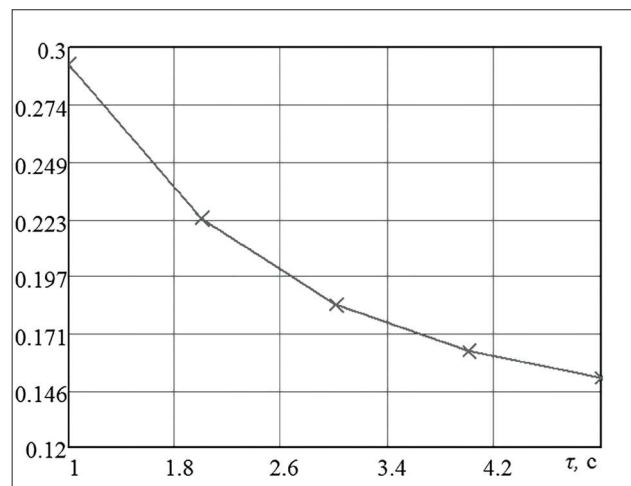


Рис. 4 – Скорость кристаллизации металла на фиксированном отрезке времени

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

С использованием составленной программы находятся точки пересечения графиков температур и линий  $t_s$  и  $t_L$ . (данные величины расшифрованы в табл. 1). Модель позволяет определять, кроме значений удельного теплового потока, положение фронта затвердевания – т. А, а также протяженность двухфазной зоны – т. В (рис. 2).

Далее рассчитывается скорость кристаллизации  $V_{кр}$ . Для этого с графика на рис. 3 снимаются значения толщины затвердевшей корки  $\omega$  и значения времени  $\tau$ .

Кривая зависимости  $V_{кр} = f(\tau)$  приведена на рис. 4.

Разработанный метод позволяет объективно и достаточно точно осуществлять оценку состояния кристаллизующегося металла, рассчитывать объем закристаллизовавшегося металла и выработать та-

кое управляющее воздействие на исполнительные устройства технологического оборудования, которое обеспечит запрессовку требуемого объема металла с учетом фактической температуры расплава.

Достоинства метода очевидны, т. к. процесс расчета может быть автоматизирован, а результаты использованы в режиме реального времени.

Для сравнения приводятся результаты проведенного компьютерного моделирования процесса в программном продукте ProCAST.

Моделирование дает возможность наблюдать заполнение литейной формы металлом, охлаждение и затвердевание отливки, формирование тепловых узлов и усадочных дефектов, выявлять места затрудненной усадки, где возможно образование трещин при кристаллизации (рис. 5).

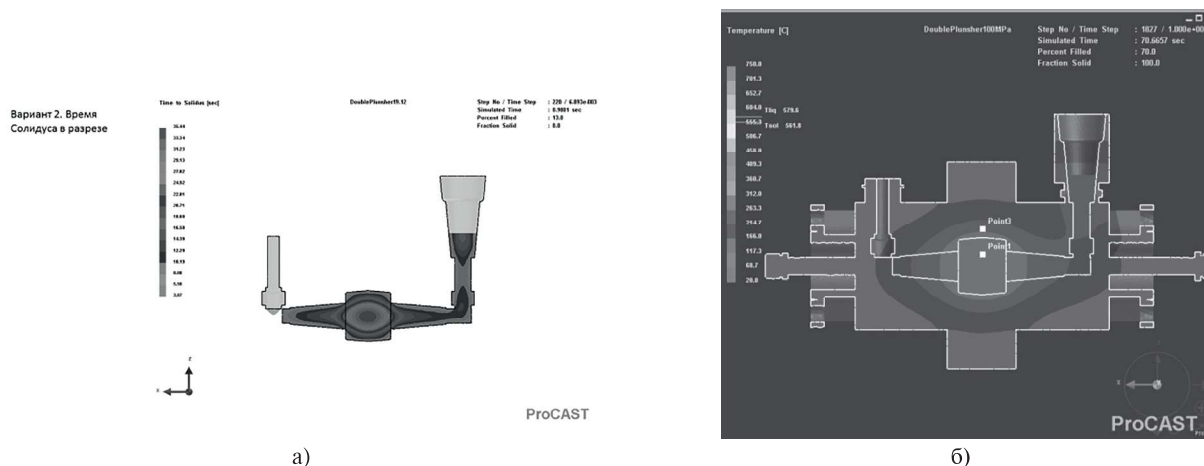


Рис. 5 — Результаты моделирования тепловых процессов в технологической оснастке при литье с кристаллизацией под давлением, где а) — через 10 с после заполнения формы; б) — через 15 с после заполнения формы

Особенность экспериментально-аналитического метода состоит еще в том, что выполнение условия (5) зависит от распределения количества теплоты, аккумулированной формой по затвердевшей, двухфазной и жидкой зонам отливки. Этого количества может быть недостаточно или больше. В редких случаях названное условие выполняется за один проход. Сходимость итерационного процесса зависит от принятых допущений и погрешностей измерения температур. Но в процессе вычислений была выявлена важная закономерность. При подстановке в формулу (2) значения коэффициента  $\lambda$  (из справочника) даже незначительная неточность, связанная, например, с зависимостью  $\lambda$  от температуры, изменяет угол наклона кривой и не позволяет уравнивать количество теплоты, выделившееся в процессе охлаждения отливки, с количеством теплоты, аккумулированной формой за фиксированный отрезок времени. Корректировка значений  $\lambda$  требует определенных ресурсов информационно-измерительной системы, но в то же время предоставляет уникальную возможность создать отлаженную расчетную модель, которую можно встроить непосредственно в систему управления наложением давления.

Тем не менее, и данный подход оказывается контрпродуктивным, когда речь идет о сильнонеравновесных процессах. Действительно, если в предположении об адекватности математической модели тепловых процессов при расчете тепловых процессов приходится пользоваться справочными величинами, установленными в условиях стационарной теплопроводности, и при этом соглашаться с большими погрешностями, то работа с интенсивно протекающими процессами, по определению, обречена на достижение результатов, не представляющих практической ценности.

Выход из создавшегося положения может быть только один — это постановка экспериментальных

исследований, сбор и обработка эмпирической информации и ее последующее использование при программировании управляющих воздействий.

#### Заключение

Очевидно, что распределение температур в стенке отливки потребует разработки новых приемов установки термопар. Для исключения инструментальных погрешностей обработку первичной информации, получаемой от термопар, необходимо осуществлять с использованием программируемых приборов.

Наряду с задачей фиксации фактического распределения температур в отливках той или иной геометрической формы в зависимости от величины и характера изменения во времени накладываемого давления, возникает необходимость включить в программу исследований вопрос о скрытой теплоте кристаллизации.

С одной стороны, выделение скрытой теплоты кристаллизации представляет собой процесс, который даже в условиях глубокого переохлаждения проходит до конца.

С другой стороны, возможность осуществлять аморфизацию расплава дает основание для предположения о том, что переход из жидкого в твердое состояние может проходить, минуя кристаллизацию, а значит, без выделения скрытой теплоты кристаллизации (СТК) [9].

Прямых измерений выделения скрытой теплоты кристаллизации нет, поэтому в перспективе ставится задача получить такие данные за счет измерений с помощью термопар, которые предполагается разместить на разном удалении от центра отливки. Наибольший интерес будут представлять показания термопары, расположенной непосредственно в центре полости формы. Если считать, что в нормальных условиях при охлаждении расплава чистого алюминия кристаллизуется по известным законам [10] и по результатам замеров температур рассчитать СТК не трудно, то при

наложении давления на расплавленный металл процесс кристаллизации может протекать по неизученным законам и результат предсказать трудно. Есть основания предполагать, что после такого воздействия, время выделения скрытой теплоты кристаллизации сократится, а количество выделяющейся теплоты будет зависеть от интенсивности теплоотвода и значения накладываемого давления.

**Работа выполнена частично на средства гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (номер гранта — МК-181.2021.4).**

#### Библиографический список

1. Васькин В., Кропотин В., Обухов А. Математическое моделирование и литейные технологии // CADmaster. 2002. № 4 (14). С. 35–39. ЗАО НПО «МКМ» (г. Ижевск).
2. Денисов М.С. Повышение физико-механических свойств поршней ДВС на основе автоматизации управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл, Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2018 4–2, с 124–135.
3. Николаева Н.В. Разработка методики процессов литья по выплавляемым моделям с использованием программного продукта ProCast / Н.В. Николаева, А.В. Рогожкин, Р.А. Вдовин // Технология и мехатроника в машиностроении. Решетневские чтения. – 2014. – С. 419–420.

4. Денисов М.С. Компьютерное моделирование процессов литья с кристаллизацией под давлением / А.Г. Котов, С.М. Петухова // Автоматизация в промышленности. 2021. № 4. С. 48–51.

5. Денисов М.С. Обоснование технологических режимов обработки кристаллизующегося металла давлением с использованием программного продукта ProCAST.

6. Denisov M.S. The Control-and-Measuring System Built-in Automatic Control System by the Technical Casting Process with Piezocrystallization. Springer Nature Switzerland AG 2020 A. A. Radionov and A. S. Karandaev (Eds.): RusAutoCon 2019, LNEE 641, pp. 852–860, 2020.

7. Денисов М.С. Разработка процесса опрессовки жидкого металла с ускоренным охлаждением. Актуальные проблемы науки XXI века 2 часть: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. – Москва, 2016, – С. 21–24.

8. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ., 1959.– 356 с.

9. Хацаюк М.Ю. Математическое моделирование процессов литья и кристаллизации алюминиевых сплавов в электромагнитном поле с учетом свободной поверхности жидкого металла / М.Ю. Хацаюк, А.В. Минаков, М.В. Первухин // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сборник научных трудов. – Екатеринбург: [УрФУ], 2014. – С. 111–115.

10. Е.И. Марукович, И.Л. Захаров, А.М. Брановицкий, Д.В. Довнар. Моделирование процессов литья под давлением алюминиевых сплавов // Литьё и металлургия. 2006. № 2–1 (38).

*Денисов Максим Сергеевич* – канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники, ВлГУ  
denisovmaxim90@mail.ru

*Maxim Denisov* – PhD, associate Professor of the Department of automation, mechatronics and robotics of VISU  
denisovmaxim90@mail.ru



## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПУСКА ГОДНОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ПОСЛЕ ОТВЕТСТВЕННОЙ ОПЕРАЦИИ С ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЗАГРУЗКОЙ В MES-СИСТЕМУ

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PRODUCTION OF SUITABLE PRODUCTS BY INTRODUCING A COORDINATE MEASURING MACHINE INTO THE TECHNOLOGICAL PROCESS AFTER A RESPONSIBLE OPERATION WITH FURTHER LOADING INTO THE MES SYSTEM

*В статье указано, что автоматизация производственных процессов является важной задачей для любого предприятия. Определено, что для снижения количества дефектной продукции необходимо внедрить КИМ после ответственных операций технологического процесса. Указано, что для перерасчета производственного расписания следует применять MES-систему.*

*The article indicates that the automation of production processes is an important task for any enterprise. It was determined that in order to reduce the number of defective products, it is necessary to introduce KIM after critical operations of the technological process. It is indicated that the MES system should be used to recalculate the production schedule.*

**Ключевые слова:** производство, MES-система, технологический процесс, КИМ.

**Keywords:** manufacturing, MES-system, technological process, KIM.

### Введение

Автоматизация производственных процессов на предприятиях на сегодняшний день является одним из актуальных вопросов [1]. Перерасчет производственного расписания является одним из тех процессов, для решения которого актуальным является применение средств автоматизации.

Такой перерасчет происходит в тех случаях, когда на ход технологического процесса влияют какие-либо несоответствия. Эти несоответствия могут быть связаны как и с выходом из строя технологического оборудования, участвующего в технологическом процессе, так и с возникновением дефектов продукции. Дефектная продукция классифицируется по степени возможности исправления на устранимый дефект и неустраняемый дефект. В том случае, если дефект является устранимым, такую продукцию отправляют на доработку. Если дефект является неустраняемым, то продукцию изолируют, и изготавливают взамен недостающее количество изделий. В любом из вышеперечисленных случаев необходимо произвести перерасчет производственного расписания. Однако произвести такой перерасчет и при этом оптимально загрузить используемое для изготовления и контроля технологиче-

ское и высокоточное измерительное оборудование без помощи специализированных программных инструментов не представляется возможным [2].

В связи с этим применение автоматизированной системы перерасчета производственного расписания (MES-системы) видится актуальным. Системы такого типа планируют производственное расписание таким образом, чтобы оптимально загрузить производственное оборудование, используемое в технологических процессах предприятия [3].

### Метод повышения количества годных деталей в партии

Одним из методов снижения количества дефектной продукции является внедрение координатно-измерительной машины (КИМ) после ответственной операции изготовления. В этом случае происходит обнаружение дефекта на ранних стадиях изготовления деталей [4]. Благодаря этому на выход технологического процесса дефектная продукция не поступает, что положительно влияет на один из сомножителей показателя эффективности загрузки оборудования ОЕЕ, а именно на сомножитель качества [5]. При обнаружении дефекта детали после ответственной операции происходит оценка характера несоответствия

(исправимый или неисправимый дефект) и происходит перерасчет производственного расписания при помощи MES-системы, что позволяет произвести оптимальную загрузку оборудования и повысить оперативность изготовления новых деталей таким образом, чтобы не сорвать сроки изготовления всей партии [6].

В качестве примера, рассмотрим технологический процесс изготовления корпусной детали, используемой для защиты оптических элементов в конечном изделии. Данная деталь изготавливается на предприятии машиностроительной отрасли. Технологический процесс состоит из 25 операций. Для того, чтобы представить его в цифровом виде, воспользуемся системой автоматизированного проектирования технологического процесса «ТЕМП». Эта система предназначена для быстрого и качественного формирования баз данных технологических процессов для систем управления организации. Она позволяет осуществлять проектирование технологических процессов от диалогового режима с наращиванием баз зна-

ний до автоматического проектирования на основе типовых технологических процессов, параллельное с проектированием автоматизированное нормирование по шагам конкретной методики, включающей диалог с пользователем. Одной из особенностей системы «ТЕМП» является то, что она может быть интегрирована с системой оперативно-календарного планирования MES-системой «ФОБОС». Рассматриваемый в качестве примера технологический процесс, представленный в системе «ТЕМП», приведен на рисунке 1.

При помощи MES-системы «ФОБОС» смоделирована ситуация несоответствия нескольких деталей из партии требованиям конструкторской документации, как показано на рисунке 2.

На основе данных о количестве дефектных деталей, характере их брака и других критериев, система производит перерасчёт производственного расписания и визуализирует новое расписание в виде диаграммы Ганта [7], как показано на рисунке 3.

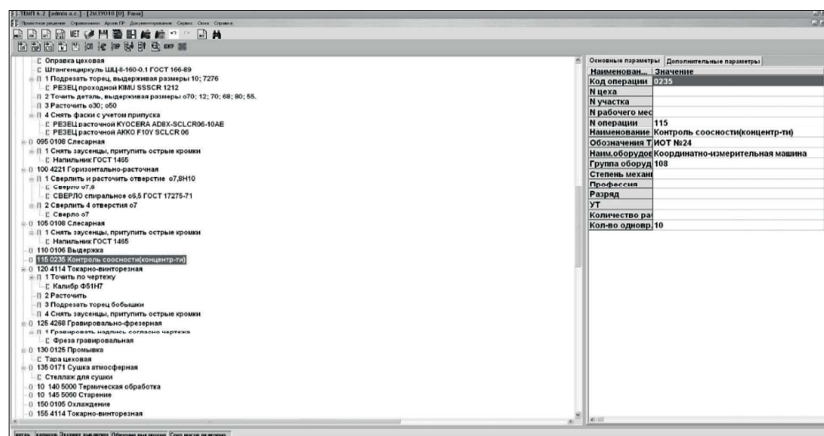


Рис. 1 – Интерфейс системы «ТЕМП» с загруженным технологическим процессом

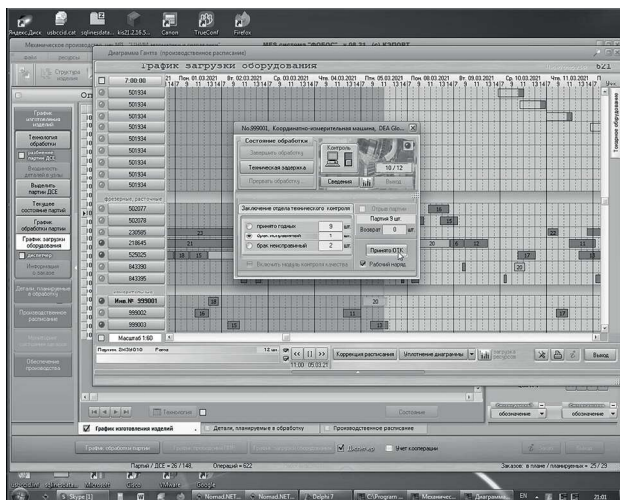


Рис. 2 – Интерфейс системы «ФОБОС» при моделировании ситуации обнаружения дефектных деталей в партии



Рис. 3 – Перерасчитанное производственное расписание, визуализированное в MES-системе «ФОБОС» при моделировании ситуации обнаружения дефектных деталей в партии

**Заключение**

Таким образом, внедрение КИМ позволяет после ответственных операций своевременно выявлять дефектные детали [8]. Кроме того, применение в целях перерасчета производственного расписания MES-системы позволяет минимизировать временные затраты на изготовление партии деталей и увеличить общей показатель эффективности, в частности благодаря повышению множителя качества. В настоящий момент важно учитывать цифровую поддержку расчета загрузки оборудования при обеспечении технологического процесса [9]. Развитие автоматизированных систем управления производственными процессами является одной из ключевых задач предприятий всех отраслей промышленности.

**Библиографический список**

1. **Пономарев, К.С.** Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия / К.С. Пономарев, М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов // «Вестник МГТУ «Станкин». — 2019 — № 4(51). — С. 19–23.
2. **Загидуллин, Р.Р.** Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах. / Р.Р. Загидуллин, под. ред. В.Ц. Зориктуева. — М.: Изд-во МАИ, 2004 — 208 с.
3. **Шутиков М.А.** Применение MES-систем для контроля геометрических параметров подшипников / М.А. Шутиков, К.С. Пономарев // «Вестник МГТУ «Станкин». — 2018 — № 4 (47). — С. 78–83.
4. Повышение эффективности работы ОТК на основе интеграции базы данных результатов контроля с системами оперативного планирования категории MES / А.Н. Феофанов, Е.Б. Фролов, В.В. Крюков, М.А. Шутиков // Технология машиностроения. — 2020. — № 12. — С. 61–64.
5. **Фролов Е.Б.** MES-системы: оперативный функционально-стоимостной анализ для нужд производственного предприятия // «Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 9. С. 76–79.
6. **Фролов Е.Б.** Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в MES-системах. / Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин // Станочный парк. — 2008. — № 11. — стр. 22–27.
7. **Шутиков М.А.** MES — системы как инструмент оптимизации загрузки контрольно-измерительного оборудования предприятия / М.А. Шутиков, А.Н. Феофанов. // Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники: сборник трудов II международной молодежной конференции. — 2018, С. 315–318.
8. **Будник, Р.А.** MES-системы: задачи и решения / Р.А. Будник. // Мир компьютерной автоматизации: журнал, 2003 — № 4 — С. 74–78.
9. **Феофанов А.Н.** Организация виртуального предприятия — будущее производства. / А.Н. Феофанов, Е.Ю. Бондарчук, С.А. Тясто // «Вестник МГТУ «Станкин» — 2018. № 3 (46) — стр. 101–105.

**Шутиков Михаил Александрович** — аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*mi.shutikov93@yandex.ru*

**Феофанов Александр Николаевич** — д-р техн. наук, проф. кафедры инженерной графики ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*feofanov.fan1@yandex.ru*

**Фролов Евгений Борисович** — д-р техн. наук, проф. кафедры информационных технологий и вычислительных систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*fobos.mes@gmail.com*

**Shutikov Mikhail Aleksandrovich** — PhD student of the Department «Automated information processing and control systems» of MSUT «STANKIN»  
*mi.shutikov93@yandex.ru*

**Feofanov Alexandr Nikolaevich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department «Engineering Graphics» of MSUT «STANKIN»  
*feofanov.fan1@yandex.ru*

**Frolov Evgeniy Borisovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Information technology and computing systems» of MSUT «STANKIN»  
*fobos.mes@gmail.com*

---

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

УДК 669.018.25

А.М. Адаскин  
A.M. Adaskin

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ЛЕГИРОВАНИЕМ СВЯЗКИ ТУГОПЛАВКИМИ МЕТАЛЛАМИ

## INCREASING THE HEAT RESISTANCE OF HARD ALLOYS DUE TO ALLOYING BONDING WITH REFRACTORY METALS

*Показана возможность повышения жаропрочности связи твердых сплавов легированием тугоплавким некарбидообразующим металлом VII группы периодической системы элементов. Это повышает теплостойкость твердых сплавов и стойкость инструмента при обработке жаропрочных материалов.*

*The possibility of increasing the heat resistance of a bond of hard alloys by alloying with a refractory non-carbide-forming metal of the VII group of the periodic table of elements is shown. This increases the heat resistance of hard alloys and tool life when processing heat-resistant materials.*

**Ключевые слова:** твердый сплав, связка твердого сплава, жаропрочность.

**Keywords:** hard alloy, hard alloy bond, heat resistance.

### Введение

Условия эксплуатации инструментов при обработке жаропрочных материалов (группа «S», ИСО ISO 513-2019) приближаются к условиям работы самих этих материалов и характеризуются высокими температурами и напряжениями. Лучшая стойкость инструмента достигается применением мелкозернистых твердых сплавов ВК («WC-Co»): ВК10-ОМ, ВК10-ХОМ [1, 2], Однако при этом не достигается ни удовлетворительной стойкости инструментов, ни производительных режимов резания. «Слабым звеном» твердых сплавов является связка на основе кобальта, не обладающая достаточной жаропрочностью [3, 4]. При нагреве инструмента в процессе эксплуатации, связка с высокой жаропрочностью прочно удерживает даже значительно изношенные карбидные зерна. И, напротив, из связки с низкой жаропрочностью, мягкой, разупрочненной при нагреве, силы резания вырывают еще не износившиеся карбиды, вызывая ускоренный износ инструмента.

Цель работы — разработка принципов легирования для повышения жаропрочности связки и, таким образом, теплостойкости твердых сплавов.

### Методика исследования

Предел прочности определяли при изгибе ( $\sigma_{изг}$ ) в соответствии с ГОСТ 20019-74, а твердость — методами Роквелла (HRA) и Виккерса (HV).

*Испытания резанием* выполняли при точении. Обрабатываемый материал — жаропрочный сплав на основе никеля ХН77ТЮР. Инструмент — резцы с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП) квадратной формы 12,7×12,7×4,75 мм (форма SNUN по ГОСТ 19042-80, стандарту ISO и 03111-0363). Режимы резания: скорости «v» — 20, 30 и 40 м/мин глубина резания «t» — 1,0 мм и подача «S» — 0,15 мм/об. *Критерий отказа* — износ по задней поверхности СМП ( $h_3$ ), равный 0,45–0,5 мм, определялся как среднее значение четырех — пяти испытаний.  $h_3$  определяли на инструментальном микроскопе МБС-10.

### Аналитическая и экспериментальная часть

Нагрев вызывает разупрочнения всех металлов и сплавов. Температура начала разупрочнения ( $T_{разупр}$ ) зависит от температуры плавления ( $T_{пл}$ ):

$$T_{разупр} = kT_{пл}, \text{ К; } k=0,5-0,6 [5],$$

Это справедливо для металлов и сплавов, не претерпевающих полиморфного превращения.

$T_{\text{разупр}}$  сплавов с полиморфным превращением определяется температурой именно этого превращения [5], более низкой, чем температура плавления. При температурах, близких к температуре полиморфного превращения, усиливается диффузионная подвижность атомов, снижаются силы межатомных связей и, как следствие, механические свойства [5]. Для сплавов на железной основе, претерпевающих  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  превращения:

$T_{\text{разупр}} = k_{\text{пр}} T_{\alpha \leftrightarrow \gamma}$ ;  $k_{\text{пр}} = 0,7-0,8$  [6] (для других металлов и сплавов  $k_{\text{пр}}$  не определено),

Полиморфное превращение в сплавах может происходить без изменения или с изменением количества фаз (эвтектоидное и перитектоидное), участвующих в превращении. Таким образом, структура связки должна представлять собой твердый раствор, не претерпевающий полиморфных превращений, включая эвтектоидное и перитектоидное. В этом случае  $T_{\text{разупр}}$  связки будет зависеть от температуры солидус — начала плавления. Кобальтовая связка не отвечает сформулированным требованиям. Кобальт претерпевает полиморфное « $\epsilon \leftrightarrow \alpha$ » превращение при  $422^\circ\text{C}$ ;  $\epsilon$  — низкотемпературная фаза, решетка ГПУ,  $\alpha$  — высокотемпературная фаза, решетка ГЦК [7]. Интенсивное разупрочнение кобальта начинается при температуре  $\sim 380^\circ\text{C}$  [8] (рис. 1а), близкой к температуре полиморфного превращения, а не плавления ( $1495^\circ\text{C}$  [7]).

Однако, жаропрочность связки существенно выше. Реализуется один из механизмов повышения прочности (жаропрочности) — твердорастворное упрочнение за счет образования легированного твердого раствора [1]. Связка твердых сплавов это не кобальт, а твердый раствор  $WC$  в  $Co$  (предельная растворимость  $WC \sim 10\%$  [1]). Такое легирование повышает температуру « $\epsilon \rightarrow \alpha$ » превращения:  $\sim 40^\circ\text{C}$  на  $1\%$   $WC$  (рис. 1б) и твердость связки со  $140-160 HV$  — твердости кобальта до  $300 HV$  при предельной концентрации  $WC$  в кобальте [9]. Это определяет достаточно высокую теплостойкость твердых сплавов и возможность обработки металлов с хорошей обрабатываемостью резанием (конструкционные стали, чугуны и т. п.) с высокими скоростями. Однако полиморфное превращение (см. рис. 1б) не позволяет радикально повысить жаропрочность связки.

Прочность межатомных связей и, таким образом, жаропрочность твердого раствора повышается при наличии в его составе элемента с высокой температурой плавления — тугоплавкого металла [5].

Связка твердых сплавов, обладающая высокой жаропрочностью должна отвечать следующим требованиям:

— основой или основным легирующим элементом должен быть кобальт, так как сплавы со связкой на основе других металлов железной группы —  $Fe$ ,  $Ni$  — обладают меньшей прочностью [10];

— сплав, соответствующий составу связки, должен быть однофазным твердым раствором системы «кобальт — тугоплавкий металл»;

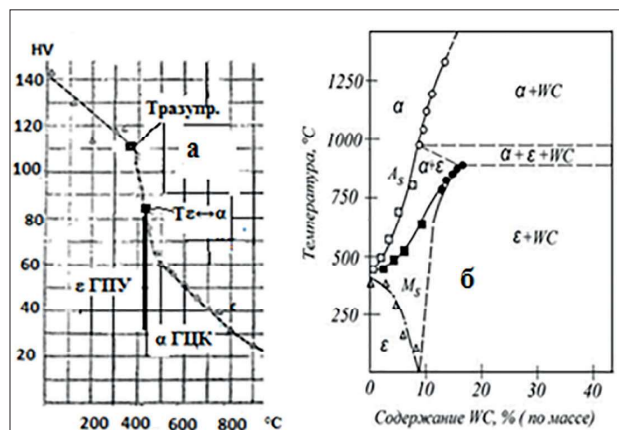


Рис. 1 — Температура разупрочнения: а — кобальта. Влияние температуры на горячую твердость кобальта; б — кобальтовой связки. Разрез по линии « $Co-W-C$ » тройной диаграммы состояния « $Co-W-C$ » [1, 8]

— сплав «кобальт — тугоплавкий металл» не должен претерпевать полиморфных превращений;

— тугоплавкий металл должен быть нейтральным по отношению к углероду, т. е. некарбидообразующим (как и кобальт). В противном случае в сплаве может возникнуть дефицит углерода, это приводит к образованию  $\eta$ -фазы —  $(CoM)_6C$  ( $M$  — тугоплавкий металл), обеднению связки кобальтом и снижению прочности [1].

В периодической системе элементов тугоплавкие металлы находятся в группах IV— VIII.

Металлы IV ( $Hf$ ,  $Zr$ ,  $Nb$ ), V ( $V$ ,  $Ta$ ) и VI ( $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$ ) групп периодической системы элементов являются сильными карбидообразующими, кроме того; все сплавы « $Co-M$ » ( $M$  — элемент IV, V, VI группы) претерпевают полиморфные превращения [7], поэтому не могут быть использованы в качестве легирующих компонентов связки.

Тугоплавкие металлы VII ( $Os$ ,  $Re$ ,  $Ru$ ) и VIII ( $Rh$ ,  $Ir$ ) групп не взаимодействуют с углеродом. Сплавы « $Co-Ir$ » и « $Co-Rh$ » использовать в качестве связки твердых сплавов нецелесообразно. Однофазные сплавы этих систем, не претерпевающие полиморфного превращения, должны содержать более  $50\%$  атомн. элемента VIII группы. Кроме того, температуры плавления  $Ir$  и  $Rh$  заметно ниже (на  $600-1000^\circ\text{C}$ ), чем  $Os$  и  $Re$  [7].

Диаграммы состояния « $Co$ —тугоплавкий элемент VII группы» — « $Co-Re$ », « $Co-Os$ » « $Co-Ru$ » — имеют одинаковую конфигурацию [7] (на рис. 2 приведена диаграмма состояния « $Co-Re$ »). Кобальт образует с рением, рутением и осмием непрерывный ряд твердых растворов. Кристаллическая решетка этих тугоплавких металлов — ГПУ, такая же, как у низкотемпературной модификации кобальта, это приводит к стабилизации  $\epsilon$  — фазы (см. рис. 2). Сплавы этих

систем подразделяются на две группы: с концентрацией ( $K$ ), тугоплавкого металла, меньшей или большей  $K_E$  (абсцисса точки «E»).

Во всех трех системах сплавы первой группы ( $K < K_E$ ) при нагреве претерпевают полиморфное превращение « $\epsilon \rightarrow \epsilon + \alpha \rightarrow \alpha$ » (см. рис. 2). По мере увеличения концентрации тугоплавкого элемента, повышается температура полиморфного превращения сплава (начало превращения – линия «422°C–E», окончание – линия «422°C–F»; 422°C – температура полиморфного « $\epsilon \rightarrow \alpha$ » превращения  $Co$ ).  $T_{разупр}$  этих сплавов определяется температурой полиморфного превращения и возрастает с увеличением  $K$ . В сплавах второй группы ( $K \geq K_E$ ) всех трех систем, полиморфного превращения при нагреве не происходит.  $T_{разупр}$  этих сплавов определяется  $T_{пл}$ . Именно они обладают повышенной жаропрочностью.

Для выбора легирующего элемента важным является положение точки «E» на диаграмме состояния, определяющее, во-первых, необходимую концентрацию тугоплавкого элемента для получения сплава, не претерпевающего полиморфного превращения ( $K_E$ ) и, во-вторых, температуру солидус ( $T_E$  – ордината точки «E»), определяющую  $T_{разупр}$  сплава.

Состав связки твердого сплава должен отвечать следующим требованиям:

- наиболее высокая температура  $T_E$ ;
- меньшая необходимая концентрация тугоплавкого элемента  $K_E$ ;
- меньшая стоимость связки, зависящая от стоимости тугоплавкого элемента и его необходимого количества ( $K_E$ ), т. к. цена кобальта в десятки раз меньше, чем тугоплавких металлов.

Сравнительная характеристика сплавов систем «Co–Re», «Co–Os», «Co–Ru» (табл. 1) показывает, что сплава, отвечающего всем требованиям, нет.

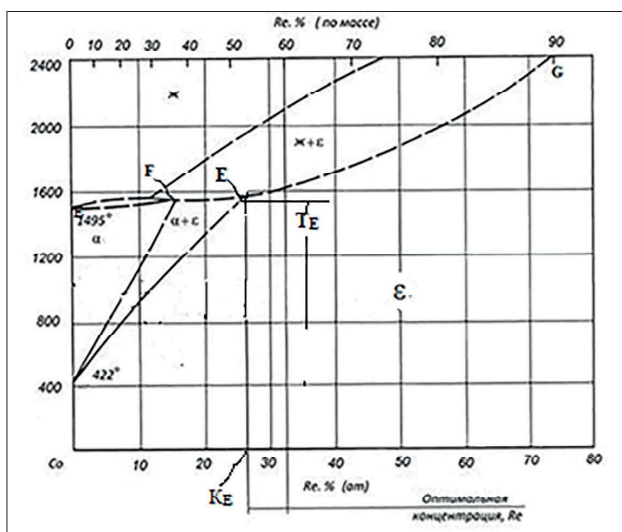


Рис. 2 – Диаграмма состояния «Co–Re» [7]

Таблица 1. Сравнительная характеристика тугоплавких металлов в связке «Co – элемент VII группы»

Тугоплавкий металл в связке	$K_E$ , % масс	Состав связки, % масс	$T_E$ , °C
Re	52	52Re+ 48Co	1550
Os	65	65Os+ 35Co	1600
Ru	50	50Ru+50Co	1450

Предпочтительной является связка «Co–Re». Стоимость рения и рутения, а также необходимая концентрация в связке близки ( $K_{ERe}=52\%$ ,  $K_{ERu}=50\%$ ), тогда как температура солидус и, таким образом,  $T_{разупр}$  выше в сплавах «Co–Re» ( $T_{ERe}$  выше  $T_{ERu}$  на 100°C, см. табл. 1).

$T_{Eos} > T_{ERe}$  на 50°C (см. табл. 1), однако использование осмия нерационально из-за его высокой стоимости (в 8–10 раз дороже  $Re$ ) и необходимо большего, чем рения, содержания в связке для получения сплава ( $K_{Eos}=65\%$ ,  $K_{ERe}=52\%$ ).

Рений некарбидообразующий элемент, не образуя собственных и не меняя состава имеющихся карбидов, входит в состав связки. При оценке влияния рения на свойства сплава следует учитывать его содержание в связке, а не в сплаве. Структура и превращения связки при нагреве для любого соотношения в ней  $Co$  и  $Re$  определяются диаграммой состояния «Co–Re» независимо от ее содержания в сплаве.

Оптимальной концентрацией рения в связке является  $K_E$ , это минимальное содержание, обеспечивающее сохранение однофазной структуры связки ( $\epsilon$  – фаза, решетка ГПУ) вплоть до температуры плавления, т. е. не претерпевающей полиморфного превращения. В сплавах с  $K < K_E$  при повышении концентрации рения температура полиморфного превращения ( $T_{\epsilon \rightarrow \alpha}$ ) и, таким образом, жаропрочность сплава возрастает быстро (~ на 25°C на 1%  $Re$ ). При  $K > K_E$  подъем  $T_{пл}$  – температуры солидус медленный (~4°C на 1%  $Re$ ), следовательно и слабый рост жаропрочности связки. Повышение концентрации рения свыше 52–55% практически не влияет на жаропрочность связки и теплостойкость твердого сплава, но приводит к снижению его прочности. Предел прочности сплавов ( $\sigma_{изг}$ , МПа) при концентрации рения в связке 52%, 60% и 70% составляет, соответственно: 1670, 1650 и 1350.

Твердые сплавы с оптимальным составом связки, но разным ее содержанием получают различные сочетания свойств «твердость – прочность». Это определяет возможность создания гаммы сплавов для обработки различных жаропрочных материалов и резания с разными режимами.

Так, разработанный нами сплав ВР7К6 [11] (Co 6%, Re 7% WC- ост) с оптимальным составом связки (52% Re, 48% Co), предназначен для чистовой и полу-

Таблица 2. Твердость и прочность сплавов ВР7К6 и ВК10-ХОМ при нагреве [12, 13]

Сплав	Свойство при температуре, °С	20	400	500	600	700	800
ВК10-ХОМ	Твердость, НV	1620	1180	—	850	—	700
ВР7К6		1680	1200	—	1000	—	800
ВК10-ХОМ	$\sigma_{изг}$ , МПа	1600	—	1450	1300	—	1200
ВР7К6		1670	1600	1600	1580	1560	1400

чистой обработки жаропрочных материалов. Механические свойства ВР7К6, выше, чем у ВК10-ХОМ, особенно при повышенных температурах (табл. 2). Для черновой может быть использован сплав ВР9К8 (расчетные значения прочности и твердости: 1700 МПа и 88HRA, не хуже, чем у сплава ВК10, при более высокой теплостойкости).

В испытаниях при разных скоростях резания стойкость СМП из ВР7К6 в 5–10 раз больше, чем из ВК10-ХОМ – сплава, позиционируемого для обработки материалов группы S (рис. 3). Аналогичные результаты получены при обработке жаропрочного сплава на основе хрома [13–15].

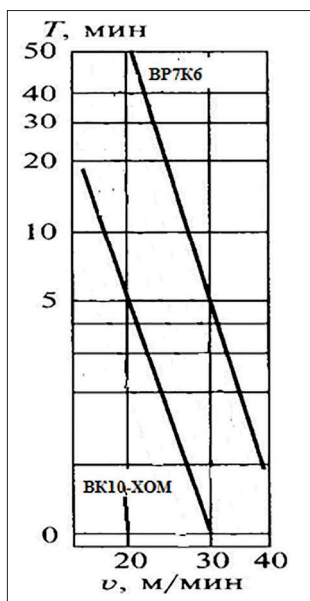


Рис. 3 – Влияние скорости резания на стойкость СМП до регламентируемого износа ( $h_3=0,45-0,5$  мм); точение сплава ХН77ТЮР;  $S=0,15$  мм/об,  $t=1$  мм

#### Выводы

Разработаны принципы легирования связи твердых сплавов для повышения ее жаропрочности и, таким образом, теплостойкости твердых сплавов. Это позволяет создать гамму твердых сплавов с разным сочетанием свойств «твердость – прочность» для разных условий обработки жаропрочных сталей и сплавов.

На основании установленных положений создан ренийсодержащий твердый сплав оригинального состава, обладающий высокими механическими и тепловыми свойствами.

Выполненные стойкостные исследования при обработке жаропрочного сплава на никелевой основе показали заметное преимущество разработанного сплава перед мелкозернистыми сплавами группы ВК, предназначенными для обработки жаропрочных материалов группы «S» по ИСО.

#### Библиографический список

1. В.И. Третьяков. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М. Металлургия. 1976. 527 с.
2. В.С. Самойлов. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент. Справочник. / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский, А.Д. Локтев, Ю.П. Шкурин. М. Машиностроение. 1988. 387 с.
3. А.М. Адашкин, А.С. Верещака, А.А. Верещака. Необходимые и достаточные свойства твердосплавного субстрата с износостойким покрытием для режущего инструмента. Вестник МГТУ СТАНКИН № 1 (44) 2018. С. 8–12.
4. А.С. Верещака, В.С. Кушнер. Резание материалов. М. Высшая школа. 2009. 535 с.
5. С.Б. Масленков. Жаропрочные стали и сплавы. М. Металлургия. 1983. 192 с.
6. Л.С. Кремнев. Вклад Станкина в создание теории легирования, разработку и на ее основе и промышленного внедрения быстрорежущих сталей оптимального состава. Вестник МГТУ «СТАНКИН» 4 (12) 2010. с. 54–65.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Под ред. Н.П. Лякишева. М. Машиностроение. Т. 1. 911 с.
8. М.Г. Лозинский. Строение и свойства металлов и сплавов при высоких температурах. М. Metallurgizdat. 1963. 535 с.
9. М.Г. Лошак. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев. Наукова думка. 1984. 325 с.
10. Р. Кипфер, П. Шварцкопф. Твердые сплавы. М. Metallurgizdat. 1957. 664 с.

11. Патент 2521747 Российская Федерация. МПК С22С29/08. Твердый сплав на основе карбида вольфрама для обработки труднообрабатываемых материалов. Заявитель и патентообладатель Адаскин А.М., Бутрим В.Н., Верещака А.С. и др. заявл. 12.12.2012. опубл. 10.07.2014. Бюл. № 19.

12. **И.Н. Чопороав, В.И. Кудрявцева, З.Н. Сапронова.** Исследование структуры и свойств системы W-C-Re-Co. В сб. ВНИИТС Научные труды. Качество и эффективность применения твердых сплавов. М. Металлургия. 1984. с. 7–9.

13. **Adaskin A.M., Anikeev A.I., Vershchaka A.S., Kashirtsev V.V., Sapronov I.Y.** Optimal rhenium content in

hard alloys used to cut high-temperature steel and alloys. Russian Engineering Research.— 2013.— V. 33. — Is. 8. P.p. 499–503.

14. **A.M. Adaskin, S.N. Grigoriev, A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, V.V. Kashirtsev.** Cemented Carbides for Machining of Heat-Resistant Materials Advanced Materials Research Vol. 628 p.p. 37–42 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.628.37. p.p. 37–42.

15. **А.М. Адаскин.** Оптимизация состава ренийсодержащих твердых сплавов и область их рационального применения. Сборник трудов конференции «Неделя металлов». М. ВНИИМЕТМАШ 2019 ISBN 978-5-00147-095-3. С. 102–115.

*Адаскин Анатолий Матвеевич* — канд. техн. наук, доц. кафедры композиционных материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*tolia.home@list.ru*

*Adaskin Anatoly Matveevich* — candidate Sc. of Engineering associate professor department of «Composite materials» of MSUT «STANKIN»  
*tolia.home@list.ru*



## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАЗОВ В ДЕТАЛЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

## INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF VARIOUS METHODS OF MAKING GROOVES IN GTE PARTS FROM HEAT-RESISTANT ALLOYS

*Проведены исследования технологических возможностей различных способов обработки образцов из жаропрочного сплава с точки зрения трудоемкости, геометрической точности, качества поверхностного слоя.*

*Research has been carried out on the technological capabilities of various methods of processing samples from a heat-resistant alloy from the point of view of labor intensity, geometric accuracy, quality of the surface layer.*

**Ключевые слова:** фрезерование, механическое шлифование, абразивное шлифование, электроэрозионная обработка, камера сгорания, жаропрочный интерметаллидный сплав.

**Keywords:** milling, mechanical grinding, abrasive grinding, electrical discharge machining, the combustion chamber, heat-resistant intermetallic alloy.

### Введение

В современных и перспективных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) используются камеры сгорания со сборно-разборной конструкцией жаровой трубы. В качестве конструкционного материала используется жаропрочный интерметаллидный сплав на основе никеля ВКНА-1В-ВИ [1]. Сплав обладает высокими прочностными характеристиками, высокой стойкостью к температурной и химической коррозии, имеет рабочую температуру до 940 °С [1, 2]. Применение данного материала позволяет снизить расход воздуха на охлаждение жаровой трубы и повысить КПД двигателя на 3 % [1-2]. Данный материал трудно обрабатывается лезвийными методами. Отмечается высокая трудоемкость лезвийных операций при низком качестве. Происходит ухудшение точности обработки, деформации деталей под воздействием сил резания, повышение температуры в зоне обработки и, как следствие, образование измененного слоя и трещин [3].

При проведении исследований производилась обработка образцов деталей из интерметаллидного сплава ВКНА-1В-ВИ, в которых производилась обработка пазов длиной  $174,5 \pm 0,2$  мм, шириной  $1,75 \pm 0,15$  мм, глубиной  $5 \pm 0,2$  мм.

*Обработка производилась по следующим технологическим вариантам.*

1. Фрезерование производилось на горизонтально-фрезерном станке 6Т83Г1. Обработка велась

на следующих технологических параметрах: частота вращения шпинделя 16...20 об/мин, скорость рабочей подачи 3...4 мм/мин с использованием СОЖ. В качестве инструмента использована дисковая фреза диаметром 50 мм, толщиной 2 мм, материал режущей части ВРК15.

2. Электроэрозионная обработка проводилась на модернизированном в НПА «Технопарк АТ» электроэрозионном станке 4Л721 с генератором технологического тока «Искра 500.50-721». Напряжение в рабочем зазоре составляло 70В, частота тока 20 кГц, номинальный ток 3 А, скважность 1,05 с релаксацией электрода-инструмента в среде рабочей жидкости керосин+масло. Обработка производилась медной пластиной толщиной 1,8 мм. С проведением дополнительной обработки абразивно-струйным методом. Абразивно-струйная обработка проводилась на дистанции до детали 100 мм, угол обдува 90°, давление составляло 0,35...0,4 МПа, марка шлифовального порошка 25А, зернистость F80, время обработки составляло 2–4 мин.

3. Механическое шлифование производилось на станке для абразивного электро-химического шлифования 4СЭШ-1 в режиме абразивного шлифования. В качестве инструмента для алмазного шлифования использовался абразивный круг марки АС20  $150 \times 32 \times 1,7 \times 5$  160/125 100 М2-02 575. Скорость рабочей подачи составляла 5...10 мм/мин в среде СОЖ, частота вращения круга – 2800 об/мин.

4. Абразивное электрохимическое шлифование производилось на станке 4СЭШ-1. В качестве электролита для обработки был выбран водный раствор 6 %  $\text{NaNO}_3$ , 0,5 %  $\text{NaNO}_2$ , 0,5 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 2 % глицерина. Плотность электролита составляет  $\rho = 1,07\text{--}1,04 \text{ г/см}^3$ . В качестве инструмента для электрохимического алмазного шлифования использовался абразивный круг на металлической связке марки АС20  $150 \times 32 \times 1,7 \times 5$  160/125 100 М2-02 575. Скорость рабочей подачи составляла 15...20 мм/мин, частота вращения круга — 2800 об/мин рабочее напряжение 6...8 В, рабочий ток 100...120 А.

5. Абразивное электрохимическое шлифование производилось на станке для абразивного электрохимического шлифования Наромат PRO 100, который был модернизирован в НПА «Технопарк АТ». Станок укомплектован источником технологического тока «Iskra 500-50», дополнительным источником питания для подачи импульсов обратной полярности и дополнительным очищающим электродом-инструментом.

В качестве электролита для обработки был выбран водный раствор 6 %  $\text{NaNO}_3$ , 0,5 %  $\text{NaNO}_2$ , 0,5 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 2 % глицерина. Плотность электролита составляет  $\rho = 1,07\text{--}1,04 \text{ г/см}^3$ . В качестве инструмента для электрохимического алмазного шлифования использовался абразивный круг на металлической связке марки АС20  $150 \times 32 \times 1,7 \times 5$  160/125 100 М2-02 575. Скорость рабочей подачи составляла 35...40 мм/мин, напряжение — 8...10 В, ограничение по току — 150...200 А, частота вращения круга — 2800 об/мин. На дополнительный электрод для очистки подавалось напряжение 15 В, средний ток составлял 10 А, межэлектродный зазор составлял 0,05 мм.

**Результаты и обсуждения**

В связи с тем, что обрабатываемый материал обладает высокими адгезионными свойствами и повышенной вязкостью, при механической обработке происходит быстрое наволакивание материала на режущий инструмент (фрезерование, механическое шлифование), из-за чего увеличивается температура в зоне резания, повышаются силы резания, увеличивается износ инструмента, поэтому обработка производилась на малых скоростях рабочих подач.

На рисунке 1 представлены результаты трудоемкости обработки пазов длиной  $174,5 \pm 0,2$  мм, шириной  $1,75 \pm 0,15$  мм, глубиной  $5 \pm 0,2$  мм различными методами.

В результате высокой вязкости материала и тонкостенной конструкции образцов происходит их деформация под действием усилий, возникающих в процессе обработки, что приводит к снижению точности ширины паза по глубине.

На рис. 2 представлены зависимости изменения ширины паза по глубине от вида обработки.

Применение комбинированного электрического и механического воздействия, реализуемого в процессе абразивного электрохимического шлифования,

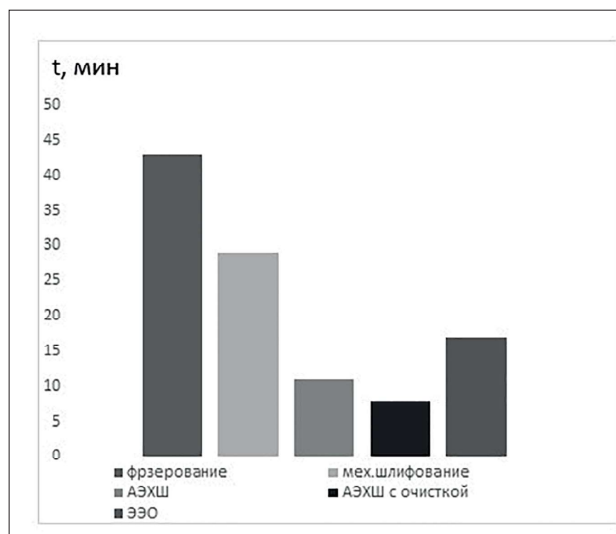


Рис. 1 — Трудоемкость получения продольного паза различными методами

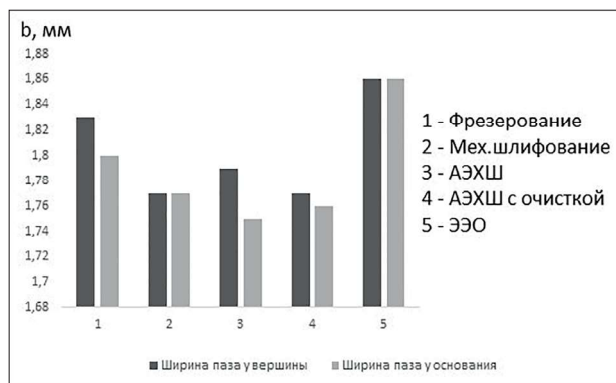


Рис. 2 — Зависимости изменения ширины паза по глубине от вида обработки

характеризуется съемом материала за счет одновременно протекающих процессов: анодного растворения, механического резания алмазными зернами и электроэрозионных явлений. При обработке на малой величине рабочих подач за счет увеличения доли электрохимического растворения ухудшается точность обработки. С увеличением скорости рабочих подач точность обработки повышается, но при этом возрастает засаливание режущего инструмента, усиливаются короткие замыкания, увеличиваются доли механической и электроэрозионной составляющей, что приводит к ухудшению качества поверхностного слоя обрабатываемой детали. Для решения этой проблемы необходима своевременная очистка и, по мере износа, правка круга. Исследования показали, что метод АЭХШ с периодической очисткой режущего инструмента позволяет повысить геометрическую точность обрабатываемых деталей и обеспечить оптимальные параметры качества их поверхностного слоя.



**Рис. 3** – Микроструктура поверхностного слоя образца детали после фрезерования (увеличение  $\times 100$ )

Исследования качества поверхностного слоя (рис. 3) показали, что в поверхностном слое материала образца наблюдается выдавливание материала, измененный слой, прижоги, трещины не обнаружены.

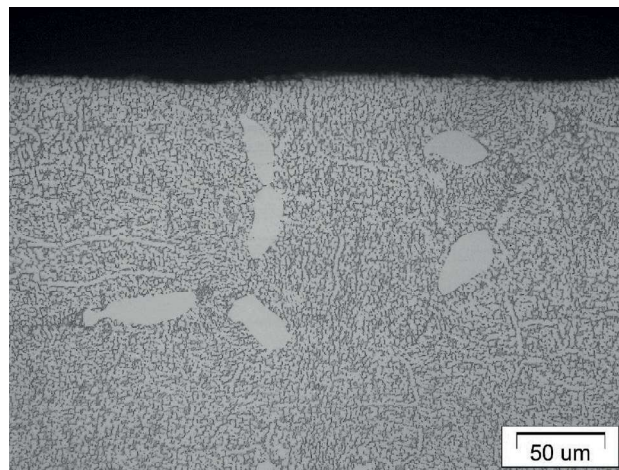
После проведения электроэрозионной обработки на поверхности образца детали образуется не сплошной измененный слой величиной 8...12 мкм. После проведения дополнительной абразивно-струйной обработки измененный слой на поверхности образца детали не наблюдается (рис. 4).

Применение ЭЭО обеспечивает возможность получения обработанных поверхностей детали в соответствии с требованиями чертежа. Применение АСО позволяет удалить остаточный измененный слой, снизить шероховатость и повысить жаростойкость детали, в поверхностном слое образуется слой наклепа с повышенной микротвердостью, который защищает подповерхностные слои материала от воздействия высокотемпературного окисления.

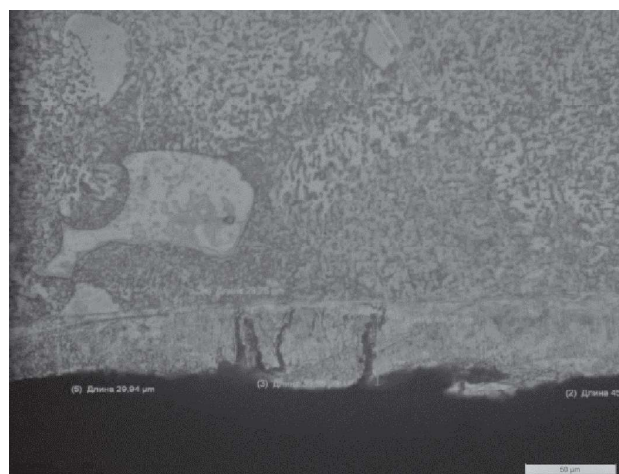
При механическом шлифовании, в результате засаливания инструмента, увеличения температуры резания в зоне обработки, происходит перегрев поверхностного слоя, в результате происходит возникновение измененного слоя до 50 мкм, микротрещин и прижогов (рис. 5).

Для решения проблем образования прижогов, микротрещин и измененного слоя целесообразно применение абразивного электрохимического шлифования (АЭХШ). За счет такой комбинированной обработки происходит снижение усилий резания, повышение производительности, некоторое улучшение качества поверхностного слоя. Тем не менее проблемы засаливания абразивного инструмента и, как следствие, увеличение сил резания, ухудшение качества поверхностного слоя являются актуальными.

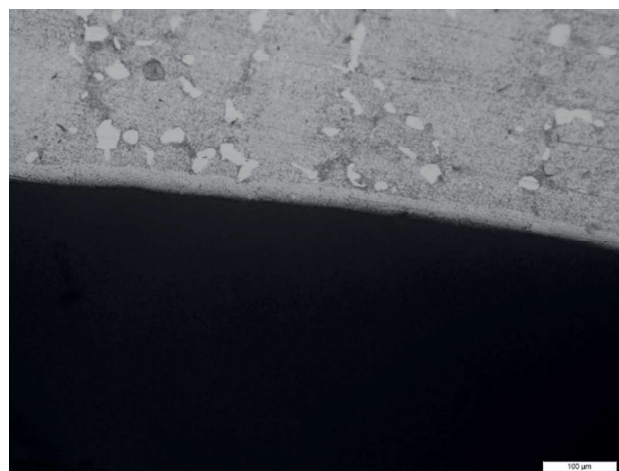
Исследования микроструктуры поверхностного слоя (рис. 6) показали, что в поверхностном слое



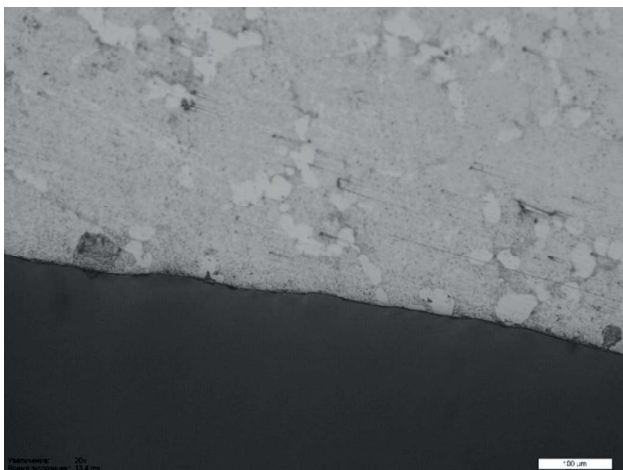
**Рис. 4** – Микроструктура поверхностного слоя образца детали после электроэрозионной обработки с дополнительной абразивно-струйной обработкой (увеличение  $\times 50$ )



**Рис. 5** – Микроструктура поверхностного слоя образца детали после механического шлифования (увеличение  $\times 50$ )



**Рис. 6** – Микроструктура поверхностного слоя образца детали после абразивного электрохимического шлифования (увеличение  $\times 100$ )



**Рис. 7** — Микроструктура поверхностного слоя образца детали образца детали после абразивного электрохимического шлифования с периодической очисткой (увеличение  $\times 100$ )

материала образца детали наблюдается измененный слой величиной 5–7 мкм.

После обработки АЭХШ с периодической очисткой абразивного инструмента в поверхностном слое материала детали измененный слой, прижоги, трещины не наблюдаются (рис. 7).

#### **Заключение**

В результате анализа различных методов обработки, наиболее перспективным при обработке пазов в

деталях из жаропрочных интерметаллидных сплавов является абразивное электрохимическое шлифование с периодической очисткой рабочего инструмента, которое позволяет повысить производительность обработки, обеспечить точность, повысить качество поверхностного слоя.

#### **Библиографический список**

1. **Базылева О.А.** Влияние высокотемпературного отжига на структуру и свойства сплавов на основе интерметаллида Ni3Al / О.А. Базылева [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2016. № 1 (106). С. 112–122. [O.A. Bazyleva, et al., “Effect of high-temperature annealing on structure and properties of Ni3Al intermetallic compound in alloys, (in Russian), in Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, no. 1 (106), pp. 112–122, 2016.]

2. **Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А.** Новый литейный сплав ВКНА-1В // Авиационная промышленность. 1991. № 12. С. 39–40. [V.P. Buntushkin, E.N. Kablov, O.A. Bazyleva, “New casting alloy VKNA-1V”, (in Russian), in Aviacionnaya promy’shennost, no. 12, pp. 39–40, 1991.]

3. **Маслов Е.Н.** Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с. [E.N. Maslov, Theory of grinding material, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1974.]

**Таймасова Лилия Альбертовна** — ведущий инженер-технолог НПА «Технопарк АТ»  
lagalimova@yandex.ru

**Атрощенко Валерий Владимирович** — проф. кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий  
acstsufa@mail.ru

**Ватуев Михаил Владимирович** — инженер-электроник НПА «Технопарк АТ»  
vandroiy@ya.ru

**Taymasova Lilia Albertovna** — leading engineer-technologist of SPA «Technopark AT»  
lagalimova@yandex.ru

**Atroshenko Valeriy Vladimirovich** — Prof., Department of Welding, foundry and additive technologies  
acstsufa@mail.ru

**Vatuev Mikhail Vladimirovich** — engineer-electronic of SPA «Technopark AT»  
vandroiy@ya.ru

## СОСТАВЛЕНИЕ КАРТЫ ТОЧНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СТОЛА ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ПОД НАГРУЗКОЙ

### MAPPING ACCURACY OF MOVEMENTS OF THE MILLING MACHINE TABLE UNDER LOADING

*В статье представлена методика оценки и составления карты точности перемещений крестового стола вертикально-фрезерного станка с учетом деформаций несущей системы станка при воздействии сил резания. Проводить измерения точности траектории перемещения станка при обработке детали инструментом нецелесообразно. Необходимо моделировать эквивалентную силам резания нагрузку, исключая применение СОЖ и фактор стружки. Разработана установка для создания эквивалентной динамической нагрузки на оборудовании. Приведенная методика может быть применена для определения участков рабочей зоны станка, обеспечивающих наибольшую жесткость и точность обработки.*

*The article presents a technique for evaluation and compiling a map of the accuracy of the vertical milling machine table, considering the deformations of the supporting system of the machine under the influence of forces equivalent to cutting forces. Due to the complexity, it is impractical to measure the accuracy of the trajectory of the machine during machining a part with a tool. It is necessary to simulate the load equivalent to cutting forces, excluding the use of coolant and the chip factor. A setup has been developed to create an equivalent dynamic load on the machine tool. The proposed technique can be used to determine the locality of the working area of the machine that provide the greatest rigidity and processing accuracy.*

**Ключевые слова:** обрабатываемые центры, точность обработки, точность фрезерования, жесткость несущей системы, динамика привода, ballbar.

**Keywords:** CNC machine tools, milling accuracy, supporting system rigidity, feed drive system dynamics, ballbar.

#### I. Введение

Постоянно возрастающие требования к точности позиционирования и равномерности движения отдельных рабочих органов приводят к необходимости определения объемной точности (ОТ) перемещений станков с ЧПУ [1]. Форма и значение возникающих отклонений при обработке на станках зависит от инерционных и упругодиссипативных свойств механической части привода, а также от коэффициентов настройки контуров скорости и положения [2]. В процессе работы привода возникают колебания, связанные с деформацией винта, муфты и вала двигателя.

Вибрации, неизбежно возникающие в процессе резания, и особенно фрезерования, являются фактором, существенно снижающим точность перемещений и качество обработки. Вибрации в процессе резания значительно зависят от положения узлов станка, режимов резания и множества иных факторов [3]. Амплитуда колебаний также определяется коэффициентами демпфирования этих элементов привода [4]. Исследования зависимостей точности перемещений от позиции узлов станка и собственных частот представлены в зарубежной литературе [5, 6].

Компоновка станка неизбежно влияет на его основные показатели качества: на статические, динамические и термические деформации, на распределение давлений и износ в подвижных соединениях [7]. В работе В.И. Телешевского [8] показано, что объемная погрешность станка без нагрузки и даже под незначительной нагрузкой может существенно отличаться. Причиной таких различий является конструктивные особенности станков, контактные деформации или образование зазоров на наиболее нагруженных участках ШВП и направляющих, которые при приложении внешней нагрузки выбираются, что увеличивает отклонения от заданной траектории для разных участков рабочей зоны станка.

Оценка точности оборудования согласно действующим нормативным документам проводится без нагрузки на узлы станка и не дает адекватной картины точности реальных перемещений в процессе обработки. Точность в процессе реальной обработки с задействованием наклонно-поворотных осей, в том числе непрерывной пятиосевой обработкой, может быть оценена с помощью различных стандартных и специальных тестовых деталей [9]. Однако обработка тестовой детали позволяет оценить возможность

изготовления детали по выбранной технологии, определить точность обработки с учетом деформаций всей технологической системы, но не позволяет определить причины отклонений.

Чтобы установить влияние состояния механической части привода при перемещениях по нескольким координатам под нагрузкой, характерной для процесса резания, необходимо создать эквивалентную нагрузку, имитирующую процесс резания.

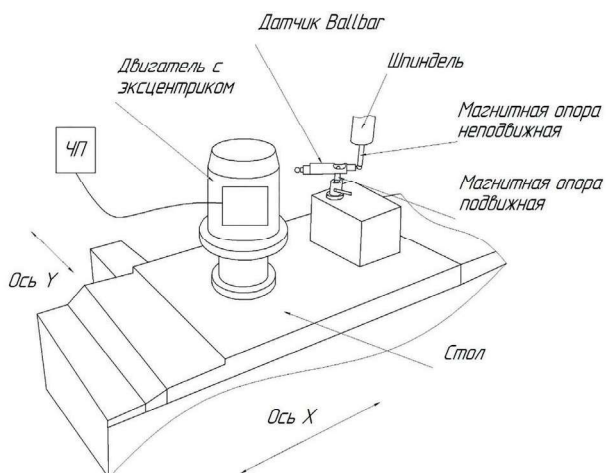
**II. Постановка задачи**

В данной статье были поставлены следующие задачи:

1. Разработка способа имитации вибраций в процессе резания для крестового стола фрезерного станка в требуемом диапазоне рабочих нагрузок, частот и пространства рабочей зоны.
2. Составление карты точности рабочей зоны стола станка под воздействием эквивалентной динамической нагрузки.

**III. Теория**

В качестве измерительного устройства предлагается использовать телескопический датчик с двумя сферическими шарнирами на конце согласно п 6.633 ГОСТ Р ИСО 230-1-2010. В данной работе применялся прибор Renishaw Ballbar QC-20W со встроенным пьезодатчиком с точностью измерения ± 0,5 мкм. Программное обеспечение данного прибора позволяет при перемещении по круговым траекториям выделить из динамически изменяющегося радиуса множество элементарных погрешностей: люфты в ШВП и направляющих, неперпендикулярность осей, рассогласование приводов и многие другие неточности. Одна из магнитных опор устанавливается на подвижном крестовом столе, другая магнитная опора зажимается в шпинделе. На рис. 1 представлена предлагаемая схема установки для создания и измерения амплитуды вынужденных колебаний, имитирующей процесс фрезерования.



**Рис. 1** — Схема измерения виброустойчивости при нагружении вибрацией стола фрезерного станка

Для создания эквивалентной нагрузки предлагается использование внешнего источника вынужденных колебаний, передающего усилие непосредственно на стол станка. Для этого в установке применяется жестко закрепленный на столе корпус с трехфазный электродвигатель, подключенный через частотный преобразователь, на конце вала которого эксцентрично установлен сборный груз изменяемой массы. Неуравновешенные элементы вращающихся масс вызывают динамический дисбаланс. Таким образом, действующая на груз центробежная сила передается на стол станка и может изменяться в зависимости от массы груза и частоты вращения ротора двигателя. Это позволяет приложить к столу станка вибрационную нагрузку с допустимыми условностями приближенную к процессу резания. Центробежная сила, создающая вынужденные колебания, рассчитывается по формуле

$$F_u = m \cdot e \cdot \omega^2, \tag{1}$$

где  $m$  — масса дисбаланса, кг;  $e$  — эксцентриситет, м;  $\omega$  — частота вращения шпинделя, 1/с. Набор изменяемых параметров подбирается экспериментально по амплитуде и частоте возникающих в процессе пробного резания колебаний.

Измерения проводились многократно в каждой точке измерения с изменением скорости подачи и частоты вынужденных колебаний, положение точек измерения (а-е) и источника вынужденных колебаний на виде сверху на стол станка приведены на рисунке 2.

**IV. Результаты исследования**

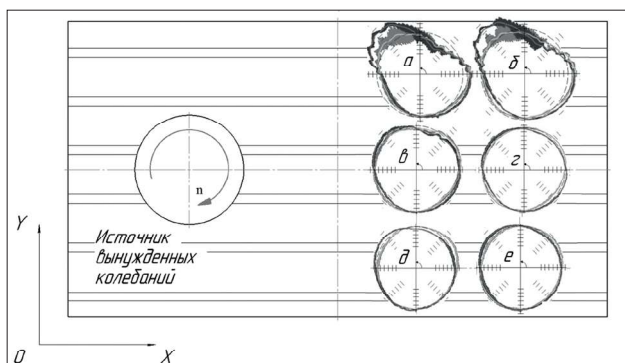
Круговая диаграмма, построенная под действием нагрузки, позволяет определить вышеописанный ряд отклонений согласно известным алгоритмам [12]. Картины геометрической точности оборудования под нагрузкой дает значительно больше информации для анализа влияния состояния оборудования на точность исполнения траекторий при обработке.

На рисунке 3 наблюдается значительное увеличение амплитуды колебаний вплоть до 40 мкм в верхних точках измерения, которые приводят к снижению точности обработки. Можно отметить повторяемость средних значений в экспериментах под нагрузкой и на холостом ходу.

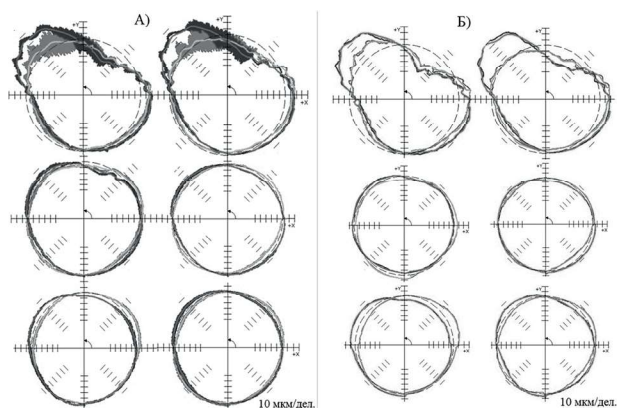
Причиной данного явления является локальный износ в ШВП и направляющих. В большей части рабочей зоны амплитуда колебаний не превышает 5 мкм.

Получаемая картина фактической точности станка под нагрузкой позволяет визуально отобразить распределение в рабочем пространстве станка точности несущей системы станка в процессе, имитирующем обработку, а также использовать эту информацию при определении технологических возможностей оборудования;

определять эффективные пределы корректирующих воздействий для системы числового программного управления (ЧПУ) металлорежущих станков и иного технологического оборудования.



**Рис. 2** – Схема приложения силы и расположения точек измерения при исследовании податливости стола станка (результаты измерений изображены схематически)



**Рис. 3** – Результаты измерения точности стола станка при приложении вибрационной нагрузки к перемещающемуся по окружности крестовому столу в зоне испытаний

## VI. Выводы и заключения

1. Создание карт точности под нагрузкой позволяет определить зоны с наибольшей и наименьшей жесткостью несущей системы станка, а также проводить сравнительные испытания состояния и жесткости различных единиц технологического оборудования.

2. Представленная методика позволяет измерить с высокой точностью и оценить фактическое влияние состояния станка на точность кругового движения двух линейных осей под воздействием нагрузки имитирующей силы резания при фрезеровании.

**Блохин Дмитрий Андреевич** – ассистент кафедры металлорежущих станков и инструментов  
ФГБОУ ВО «ОмГТУ»  
*blohin.da@mail.ru*

**Дроздов Игорь Николаевич** – начальник цеха АО «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс»  
*ceh2@progress-omsk.ru*

## Библиографический список

1. **Телешевский В.И.** Повышение точности многокоординатных технологических и измерительных систем на основе лазерной коррекции объемных геометрических погрешностей / В.И. Телешевский, В.А. Соколов, Я.И. Пимушкин // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 4 (47). С. 99–104.
2. **Бушуев В.В.** Кинематическая точность зубофрезерных станков нового поколения / В.В. Бушуев, В.В. Бушуев, В.А. Новиков // Вестник МГТУ Станкин. 2016. № 3(38). С. 8–13
3. **Brecher C.** Axis position dependent dynamics of multi-axis milling machines / C. Brecher, H. Altstadter, M. Daniels // Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 508–514.
4. **Бушуев В.В.** Определение приведенных коэффициентов демпфирования элементов привода подачи станков с передачей винт-гайка качения / В.В. Бушуев, В.А. Новиков // Вестник МГТУ Станкин. 2016. № 4 (39). С. 22–26.
5. **Deng C.** Analysis of the machine tool dynamic characteristics in manufacturing space based on the generalized dynamic response model / C. Deng, Y. Liu, J. Zhao, B. Wei, G. Yin // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017. P. 1–14.
6. **Luo B.** A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool // Int. J. Mach. Tool Manuf. 2015. Vol. 92. P. 72–84.
7. **Кульга К.С.** Автоматизированное проектирование компоновок металлорежущих станков с ЧПУ с помощью CAD/CAE-систем / К.С. Кульга, Э.Р. Асбапов, А.А. Китаев, И.А. Кривошеев // Вестник МГТУ Станкин. 2019. № 2 (49). С. 63–68.
8. **Телешевский В.И.** Влияние нагрузок на лазерную коррекцию объемной точности многокоординатных технологических и измерительных систем / В.И. Телешевский, Я.И. Пимушкин, В.А. Соколов // Вестник МГТУ Станкин. 2020. № 2 (53). С. 8–13.
9. **Givi M.** Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability / Mehrdad Givi, Mayer J.R.R. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2016. Vol. 12. P. 44–55.
10. **Blokhin D.A.** Investigation of the causes of shape deviations in contour milling / Blokhin D.A. Popov A. Yu. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260, Is. 3: Mechanical Science and Technology Update. — P. 032007-1 – 032007-6.

***Blokhin Dmitriy Andreevich*** – teaching assistant of the sub-department «Metal-cutting machines and tools» of OmSTU

*blohin.da@mail.ru*

***Drozdov Igor Nikolaevich*** – workshop chief of Federal research and production center «Progress»

*ceh2@progress-omsk.ru*

---

---



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

### INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FORMING HELICAL SURFACES BY HOB CUTTERS

*Статья посвящена процессу проектирования специальной червячной фрезы для обработки фасонных винтовых поверхностей инструментов, а также экспериментальной проверке адекватности математической модели решения прямой задачи профилирования, в рамках которой производилась обработка заготовки специальной червячной фрезой и контроль формы полученной поверхности на координатно-измерительной машине Walter Helicheck Pro+.*

*The article is devoted to the design process of a special hob cutter for processing shaped helical surfaces of tools, as well as to experimental verification of the adequacy of the mathematical model for solving the direct profiling problem, within the framework of which the workpiece was processed with a special hob cutter and the shape of the resulting surface was controlled on the Walter Helicheck Pro + coordinate measuring machine.*

**Ключевые слова:** червячная фреза, формообразование, винтовая поверхность, профилирование.

**Keywords:** hob cutter, shaping, helical surface, cutting edge, profiling.

Для отработки процесса формообразования винтовых канавок была выбрана концевая фреза: диаметр  $D = 19$  мм, диаметр сердцевины  $d = 11$  мм число зубьев  $z = 5$ , углом наклона винтовой канавки  $\omega = 20^\circ$ , передний угол  $\gamma_p = -5^\circ$ , угол спинки зуба  $\alpha_1 = 30^\circ$ . На рис. 1. показан профиль концевой фрезы в торцевом сечении.

Основной и наиболее сложной задачей при проектировании червячных фрез, является задача

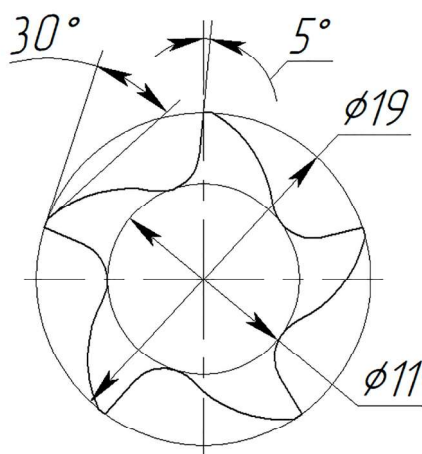


Рис. 1 — Профиль фрезы в торцевом сечении

определения профиля зубьев. Для определения профиля была использована разработанная методика [1, 2, 3, 4], в рамках которой использовалась общая модель решения задачи профилирования в среде математического моделирования Mathcad.

Для формирования исходных данных — профиля канавки в торцевом сечении в виде массива точек использовалась разработанная параметрическая математическая модель [5]. Далее задаются дополнительные параметры, которые характеризуют обрабатываемую винтовую поверхность и параметры установки инструмента на станке относительно детали: угол наклона винтовой линии ( $\omega = 20^\circ$ ), угол скрещивания ( $\varepsilon = 73^\circ$ ), радиус начального цилиндра червячной фрезы ( $R_n = 39.55$  мм), радиус начального цилиндра концевой фрезы (обрабатываемой поверхности) ( $r_n = 10.75$  мм), число заходов червячной фрезы ( $g = 1$ ).

В результате расчета модель формирует множество точек, которые являются винтовыми проекциями винтовых линий направляющих обрабатываемой поверхности [6, 7, 8]. Искомым профилем является огибающая этого множества точек (рис. 2).

Далее полученные данные были экспортированы в среду графического моделирования T-flex CAD. Был сформирован профиль червячной фрезы в осевом и нормальном сечениях (рис. 3).

Проектирование конструктивных элементов проводилось исходя из оборудования, на котором

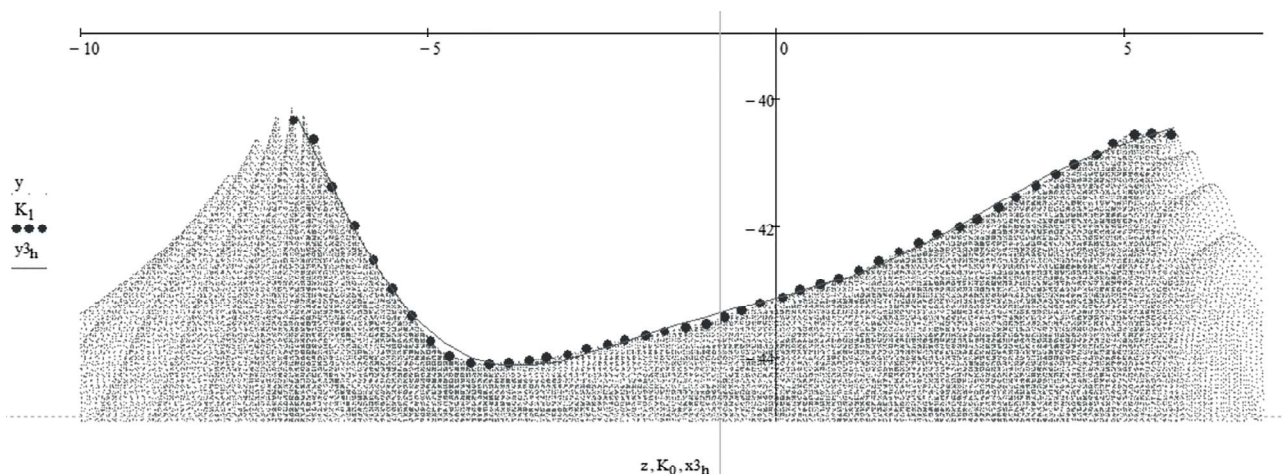


Рис. 2 — Результат решения прямой задачи профилирования специальной червячной фрезы

Профиль фрезы в нормальном сечении (M6:1)

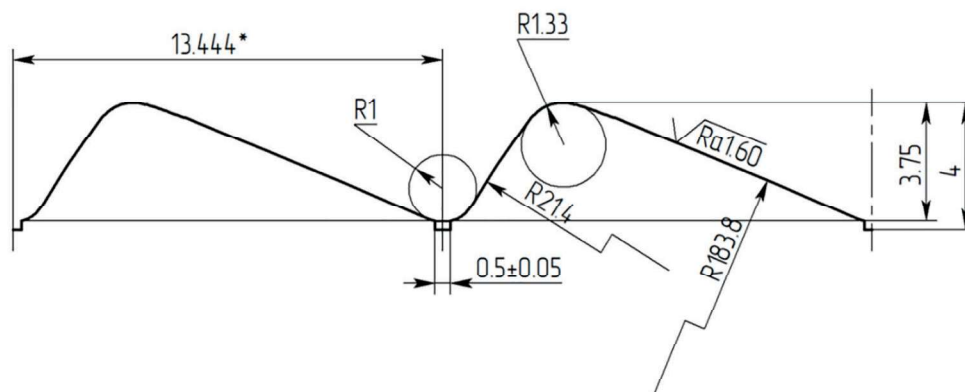


Рис. 3 — Профиль в нормальном сечении

предполагалось использовать фрезы, в частности для использования на зубофрезерном станке фирмы PFAUTER RS00S. Спроектированная червячная фреза была изготовлена на заводе ПАО «МИЗ» (рис. 4).

Далее были проведены экспериментальные исследования по отработке технологических параметров и проверке работоспособности изготовленной специальной червячной фрезы.

Эксперименты проводились на предприятии ООО «ИНСТРУМЕНТ» (г. Подольск).

Предварительно была разработана трехмерная параметрическая модель процесса обработки винтовых канавок червячной фрезой в T-flex. Модель позволила заранее отработать все аспекты, связанные с параметрами установки, и рассчитать параметры согласованных движений станка (рис. 5).

Для проведения эксперимента по обработке винтовых канавок были использованы заготовки из бронзы марки БрОЦС5-5-5 диаметром 19–0.1 мм.



Рис. 4 — Изготовленная специальная червячная фреза для обработки винтовых стружечных канавок концевых фрез

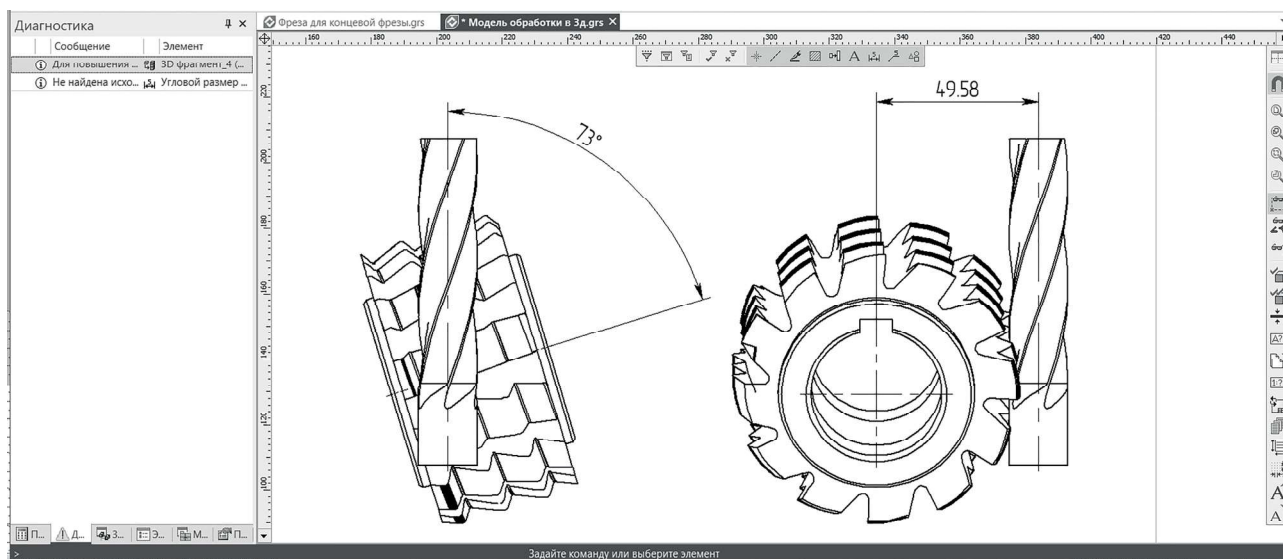


Рис. 5 — Параметры установки червячной фрезой относительно обрабатываемой детали в T-flex CAD

Обработка производилась на зубофрезерном станке PFAUTER RS00S (рис. 6).

Полученные образцы были проконтролированы на специализированной координатно-измерительной машине Walter Helicheck Pro+ в лаборатории микрообработки МГТУ «СТАНКИН» (рис. 7).

Помимо бесконтактных способов контроля, измерительная машина Walter Helicheck Pro+ позволяет производить и контактный контроль винтовых канавок инструментов с помощью щупа. Был произведен контроль профиля обработанных канавок в торцевом сечении для сравнения полученного результата с исходным профилем (рис. 1) по которому была профилирована червячная фреза.

Результат был получен в виде массива данных — координат точек в трехмерном пространстве. На основе полученных данных был сформирован DXF-файл, в котором отмечены измеренные точки относительно начала отсчета системы координат находится на оси детали (рис. 8).

Для оценки соответствия получаемых профилей было построено поле допуска на профиль винтовой канавки инструмента (рис. 9) с учётом допусков на размеры профиля в соответствии с ГОСТ 17026-71 (Фрезы концевые. Конструкция и размеры) и ГОСТ 17024-82 (Фрезы концевые. Технические условия).

В таблице 1 приведены расчетные размеры профиля и допуски, соответствующие фрезе нормальной точности, а также размеры, полученные в результате обработки. Полученный результат соответствует расчетному профилю в рамках заданной точности.

Результаты экспериментальных исследований показали, что полученный профиль фасонных винтовых канавок соответствует исходному профилю



Рис. 6 — Процесс обработки винтовых канавок концевой фрезы социальной червячной фрезой

в пределах допустимых погрешностей. Это говорит об адекватности модели, используемой для решения прямой задачи профилирования. Новый разработанный метод профилирования специальных фасонных червячных фрез для обработки фасонных винтовых поверхностей работоспособен и открывает широкие возможности по применению инструментов работающих по методу обкатки в технологиях изготовления инструментов, что способствует значительному повышению производительности и качества на этапах формирования винтовых канавок, особенно в крупносерийном и массовом производстве. Результаты исследований внедрены и используются на предприятии ООО «Инструмент» г. Подольск.

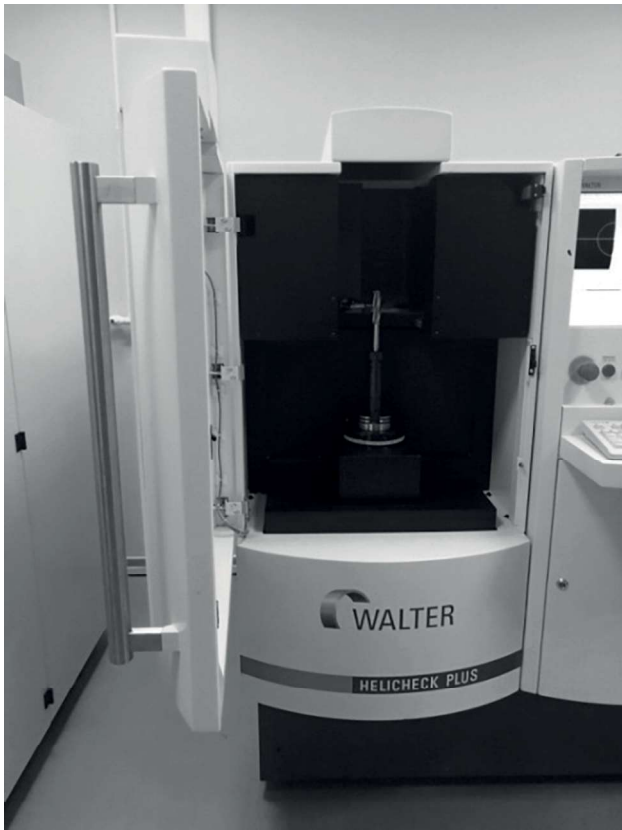


Рис. 7 – Координатно-измерительной машине Walter Helicheck Pro+

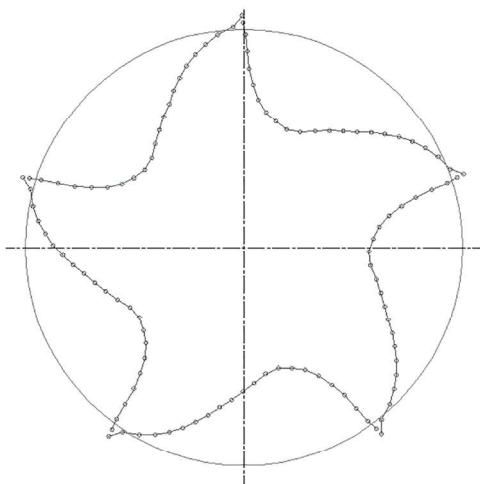


Рис. 8 – Результат контроля профиля в осевом сечении

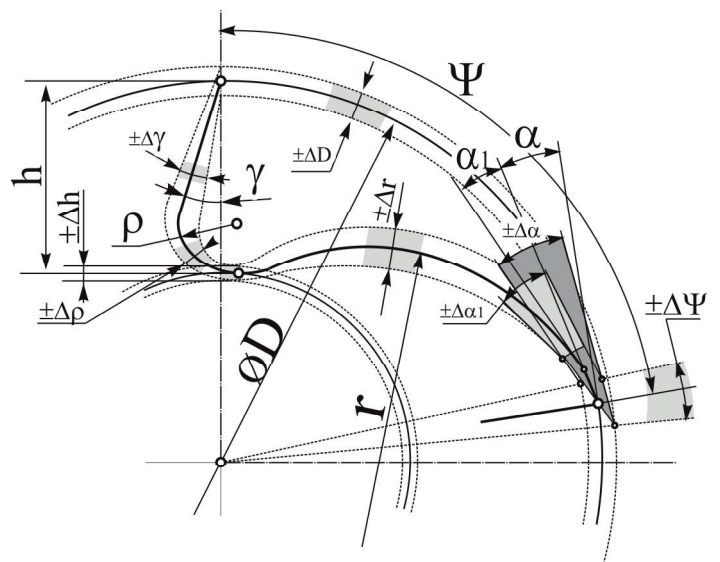


Рис. 9 – Схема построения поля допуска на профиль винтовой стружечной канавки концевой фрезы

Таблица 1. Контроль размеров полученного профиля канавки концевой фрезы

Параметры профиля винтовой канавки концевой фрезы	Допуск	Расчетные размеры и допуски $\Delta$	Размеры полученного профиля
Внешний диаметр $D$	По js12	19 (+/-0.105) мм	Окончательно формируется при заточке по ленточке
Глубина канавки $h$	IT12/2	4 (+/-0.150) мм	4.1
Радиус спинки зуба $r$	IT12/2	18 (+/-0.180) мм	17.95
Радиус дна канавки $\rho$	IT12/2	2 (+/-0.1)	1.92
Передний угол $\gamma$	$\pm 1^\circ$	$-5^\circ \pm 1^\circ$	$-4.9^\circ$
Задний угол $\alpha$	$\pm 1^\circ$	$10 \pm 1^\circ$	Формируется на последующих операциях
Ширина ленточки $f$	IT12/2	1.5 (+/-0.1) мм	Формируется на последующих операциях
Окружной шаг $\psi$	$\pm 3^\circ$	$72^\circ \pm 3^\circ$	$71.6^\circ$
Угол спинки зуба $\alpha_1$	$\pm 2^\circ$	$30 \pm 2^\circ$	$28.4^\circ$

### Библиографический список

1. Yu.E. Petukhov, P.V. Domnin. Determining worm-mill profiles / Russian Engineering Research – 2020 – Т. 40, С. 283–286.

2. Petukhov, Y.E., Domnin, P.V. Numerical shaping method for hobbing tools / Russian Engineering Research – 2020 – Т. 40, С. 76–78.

3. Domnin P.V. Nondestructive assessment of the cutting properties of wheels with a single-layer diamond-galvanic coating / Petukhov Y.E., Domnin P.V., Rubets A.A. // Russian Engineering Research. – 2016. – Т. 36. № 4. С. 309–311.

4. Петухов Ю.Е. Формообразование численными методами. М., Станкин, 2004 г. – 200 с.

5. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 4 (43). С. 100–104.

6. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Сяочуан Ч. Математическая модель определения профиля червячных фрез // Вестник машиностроения. – 2020. – № 1. – С. 10–13.

7. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. Способ определения профиля обрабатываемой поверхности по известному профилю инструмента / В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. – 2016. С. 86–90.

8. Домнин П.В., Петухов Ю.Е. Численный метод профилирования червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности / В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). – 2019. – С. 41–44.

**Петухов Юрий Евгеньевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
i.petuhov@stankin.ru

**Домнин Пётр Валерьевич** – канд. техн. наук, доц. кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
\_domnin@rambler.ru

**Желтиков Сергей Алексеевич** – аспирант кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
sergik 0072007@yandex.ru

***Petukhov Yury Evgenevich*** – D. Sc. of Engineering, professor of sub-department of «Instrumental equipment and shaping technology» of MSUT «STANKIN»

*u.petuhov@stankin.ru*

***Domnin Petr Valerevich*** – candidate Sc of Engineering, docent of sub-department of «Instrumental equipment and shaping technology» of MSUT «STANKIN»

*\_domnin@rambler.ru*

***Zheltikov Sergey Alekseevich*** – graduate student of sub-department of «Instrumental equipment and shaping technology» of MSUT «STANKIN»

*sergik 0072007@yandex.ru*

---

---

---

# РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 004-932

Ю.В. Илюхин, А.А. Топорин  
Yu. V. Ilyukhin, A.A. Toporin

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ПОДСИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

## ANALYSIS OF METHODS FOR CONSTRUCTING COMPUTER VISION SUBSYSTEMS OF MOBILE ROBOTS

*Изложены результаты разработки и исследования алгоритмов построения подсистемы технического зрения системы управления мобильным роботом. Проведен сравнительный анализ разработанных алгоритмов с точки зрения затрат времени и качества распознавания объектов при различном освещении и ориентации объектов в пространстве, а также с учётом качества входного изображения.*

*The results of the development and research of algorithms for constructing a vision subsystem of a mobile robot control system are presented. A comparative analysis of the developed algorithms is carried out in terms of recognition time and quality of object recognition under different illumination and object orientation in space, as well as the quality of the input image.*

**Ключевые слова:** мобильные роботы, система компьютерного зрения, обработка изображения, OpenCV, классификатор Хаара.

**Keywords:** mobile robots, vision system, image processing, OpenCV, Haar classifier.

### Введение

Автономный мобильный робот в процессе выполнения поставленной перед ним задачи должен быстро и точно получать информацию о своем состоянии и о состоянии окружающей среды. На данный момент выполнено множество работ, в которых основным источником данных об окружающей среде являются ультразвуковые датчики [1], лазерные дальнометры [2], радары [3] и т. д. Вместе с тем, при построении систем управления роботами наблюдается значительный рост числа и вариантов использования в них подсистем компьютерного зрения, что подтверждается работами [4–7]. В статье [8] показано, что развитие робототехники напрямую зависит от качества систем технического зрения (СТЗ), поскольку многие задачи управления роботами решаются эффективнее, если в распоряжении системы управления имеется визуальная информация.

Известно, что такую информацию системе управления робота даёт видеокамера, представляющая собой устройство, способное формировать 2D-изображение (а в некоторых случаях и 3D-изображение), содержащее сведения о цвете, форме, освещении

объектов окружающей среды, и это необходимо для их распознавания. Важно отметить, что в настоящее время по сравнению с лазерными дальнометрами и радарными видеокамеры отличаются сравнительно небольшой стоимостью и возможностью построения на их основе компактных подсистем компьютерного зрения, легко встраиваемых в различные системы, включая и мобильные роботы.

Качество работы подсистем компьютерного зрения существенно зависит от алгоритмов преобразования визуальной информации. К настоящему моменту разработано большое количество алгоритмов обработки двумерных и трехмерных изображений: от простейшего анализа контуров распознаваемых объектов [9] до использования методов глубокого обучения [10]. Выбор наиболее подходящего алгоритма представляет собой непростую задачу и требует знания их основных свойств.

Задача, решаемая при разработке подсистем технического зрения роботов, в значительной степени состоит в определении алгоритмов обработки зрительной информации. Они должны позволить в реальном времени анализировать окружающую среду,

обнаруживать и выделять в ней важные объекты и подавать на вход системы управления роботом качественные и количественные характеристики распознаваемого объекта, такие как, например, тип объекта, координаты центра, и его площадь, используемые для управления движением робота.

Целью данной работы является сравнительный анализ двух методов построения подсистемы компьютерного зрения для системы управления мобильным роботом. Первый метод основан на применении бесплатной библиотеки обработки изображения и компьютерного зрения OpenCV для поиска границ распознаваемых объектов. Второй метод предполагает использование для распознавания объектов настроенного в результате обучения каскадного классификатора Хаара.

### 1. Структура системы управления мобильным роботом

Для мобильного робота, который рассматривается в данной работе, основной целью является перемещение в пространстве, содержащем препятствия и обнаружение целевых объектов для автоматического движения к ним. Изображения этих объектов представляют собой геометрические фигуры, воспринимаемые системой технического зрения [11]. Рассматривается разработанная авторами укрупнённая структура системы управления мобильным роботом, которая представлена на рисунке 1. Эта система управления содержит систему технического зрения и комплексный регулятор, построенный с применением методов искусственного интеллекта [11]. Такой регулятор имеет два блока, каждый из которых реализует нечёткое регулирование.

Первый нечёткий регулятор отвечает за безопасный объезд препятствий при движении робота к заданной цели. В режиме реального времени он обрабатывает информацию, поступающую от трех ультразвуковых датчиков и формирует на выходе значение переменной, характеризующее наилучшее направление движения мобильного робота в сложившейся обстановке. Данное значение вместе с координатой центра распознаваемой геометрической фигуры, являющейся результатом работы СТЗ, поступает

на вход второго нечеткого регулятора, управляющего движением к цели. На его выходе образуется два коэффициента, отвечающие за изменение угловых скоростей колес мобильного робота и направления их вращения. Таким образом обеспечивается изменение положения робота в пространстве в зависимости от текущей обстановки и расположения целевой точки.

### 2. Использование функций OpenCV для распознавания объектов на изображениях

Рассмотрим алгоритм работы подсистемы технического зрения на примере распознавания фигуры «Треугольник» (рис. 2) с использованием функций бесплатной библиотеки обработки изображения и компьютерного зрения OpenCV [12].

Процесс распознавания начинается с получения изображения разрешением  $640 \times 480$  пикселей с веб-камеры (рис. 2, а), подключенной к управляющему компьютеру, расположенном на борту мобильного робота. Далее производится предварительная обработка полученного изображения (рис. 2, б), которая заключается в уменьшении шумов на изображении с использованием фильтра Гаусса с ядром  $5 \times 5$  и в переводе изображения в градации серого для уменьшения объема обрабатываемой информации и возможности его использования на следующих этапах распознавания.

Третий этап (рис. 2, в) — это выделение границ на изображении при помощи детектора границ Кэнни. Этот детектор представляет собой оператор, который использует многоступенчатый алгоритм для обнаружения широкого диапазона границ на изображении [13]. После обнаружения границ на изображении, их необходимо замкнуть в контуры. Для этого используется встроенная в OpenCV функция. Но поскольку замкнутые контуры мало говорят о типе фигуры, необходимо определить на какие фигуры эти контуры больше всего похожи. Для этого все контуры на изображении аппроксимируются прямыми линиями с заданной точностью. В результате по количеству получившихся прямых можно судить о типе фигуры. Демонстрация работы данного этапа приведена на рисунке 2, г. Однако перед этим этапом применяется морфологическая операция «дилатация» структур-

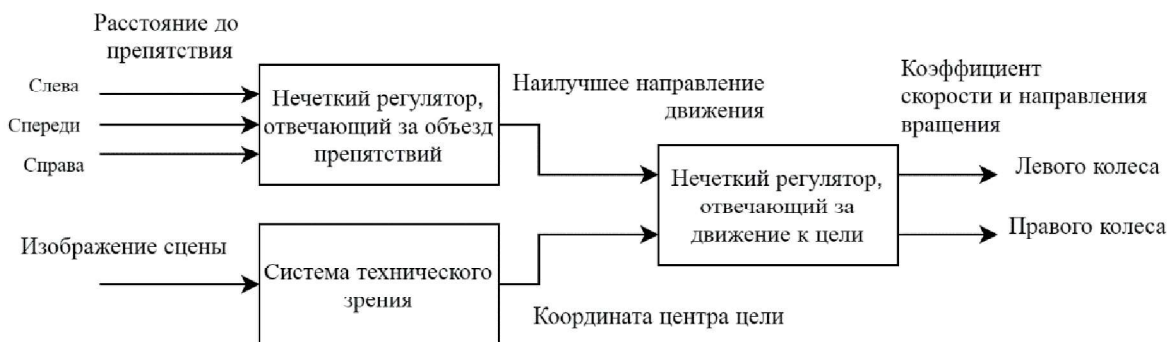
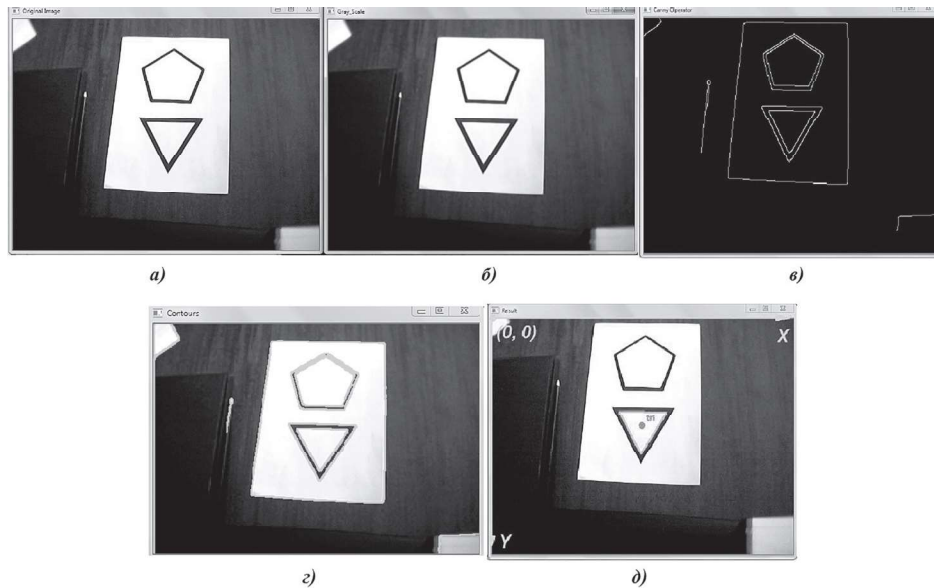


Рис. 1 – Структура системы управления мобильным роботом





**Рис. 2** — Алгоритм работы системы технического зрения: а — оригинальное изображение; б — предварительная обработка; в — применение детектора границ Кэнни; г — поиск контуров; д — результирующее изображение

ным элементом размера  $3 \times 3$ , все элементы которого принимают значение единицы. Это позволяет более четко выразить контуры распознаваемого объекта.

В результате остаются только те контуры, которые, во-первых, удовлетворяют распознаваемому типу, а, во-вторых, имеют площадь больше минимального значения. Это позволяет отфильтровать ложные контуры, обусловленные шумами на изображении. Помимо площади распознаваемого объекта, на изображении также определяется значение координаты центра фигуры с использованием алгоритма вычисления моментов нулевого и первого порядков участка изображения, ограниченного контуром фигуры. Значение координаты  $X$  (рис. 2, д) центра распознаваемой фигуры поступает на вход второго нечеткого регулятора.

Основное достоинство предложенного подхода заключается в доступности свободного программного обеспечения. Это позволяет существенно снизить стоимость подсистемы компьютерного зрения и системы управления роботом в целом. Недостатком такого подхода является необходимость обеспечения равномерного освещения в области действия робота, поскольку области «засветки» или, наоборот, затемнения, не позволяют корректно выделить границы объектов сцены и потребуются изменения алгоритмов предобработки изображения для получения лучшего результата. Для решения проблемы, связанной с распознаванием объектов при недостаточно равномерном освещении, целесообразно использовать иной метод распознавания, например, каскадный классификатор Хаара.

### 3. Использование каскадного классификатора Хаара для распознавания объектов

Высокая скорость обработки информации является главным преимуществом детектора Хаара. Особенности его работы позволяют с лёгкостью обрабатывать видео в реальном времени. Детектор Хаара изначально был изобретен для распознавания лиц, но на данный момент область его применения оказалась значительно шире. Он может использоваться для распознавания автомобилей, дорожных знаков, животных и многого другого [14].

Детектор Хаара формируется путем обучения нескольких так называемых «сильных классификаторов», образующих каскад [15]. Каждый «сильный классификатор» дает оценку того, есть ли на изображении необходимый объект или его нет, и, если объект присутствует, передает управление следующему в каскаде классификатору. Если все «сильные классификаторы», входящие в каскад, распознают на изображении объект, то только в этом случае детектор выделит объект на изображении. Каждый «сильный классификатор» состоит из совокупности «слабых классификаторов», которые представляют собой функции, вычисляющие значения соответствующего ей признака Хаара для входного изображения и сравнивающие это значение с вычисленным на этапе обучения пороговым значением. Если порог превышен, то данный «слабый классификатор» допускает наличие на изображении распознаваемого объекта.

Для работы с классификатором его необходимо обучить. Для этого требуется собрать выборку позитивных изображений, на которых есть распознаваемый

объект и негативную выборку, на которой объекта распознавания нет. Чем больше будут выборки, тем с большей вероятностью классификатор правильно обнаружит необходимый объект. Также выборка должна быть разнообразной. Это значит, что объект должен быть сфотографирован при разном освещении, при разных углах, в разных помещениях и т. д. Это требование касается и позитивной, и негативной выборки.

Процесс обучения классификатора выполнялся в пакете прикладных программ Matlab с использованием функции `trainCascadeObjectDetector`. Для ее работы необходимы следующие элементы: таблица параметров рамок, полученных после более точного выделения распознаваемых объектов в позитивной выборке, директория, в которой содержатся позитивные изображения, директория, в которой содержатся негативные изображения, а также установка параметров обучения. Основными параметрами являются число стадий обучения классификатора  $N$  и допустимая частота ложных срабатываний  $FAR$ . Ложное срабатывание — это ошибочное определение участка изображения, как содержащее распознаваемый объект, в действительности его не содержащее (в данном случае, негативное изображение, ошибочно классифицированное как положительное). Частота ложных срабатываний — это отношение количества ошибочных классификаций негативных событий (изображений) как положительных, к общему числу негативных событий (изображений). Процесс обучения классификатора является итерационным и связан с поиском значений этих двух параметров для получения качественной работы каскада применительно к конкретной задаче.

**4. Сравнение методов построения компьютерного зрения мобильного робота при распознавании объекта**

В качестве объекта распознавания была выбрана фигура «Треугольник». Было обучено 10 вариантов каскада, различающихся размером обучающей выборки и значениями параметров обучения. Для обучения составлено две выборки позитивных изображений:

- выборка, состоящая из 198 изображений объекта, полученных с расстояния около 40 см при разном освещении и под разными углами, именуемая в дальнейшем «Малая»;

- выборка, именуемая в дальнейшем «Большая» и состоящая из 439 фотографий, в число которых входят все изображения выборки «Малая» и фотографии, полученные путем съемки объекта с расстояний более 5 метров.

Негативная выборка состоит из 1961 изображения.

Варианты настройки каскада представлены в таблице 1.

Для проверки работы обоих методов были составлены две тестовые выборки, состоящие из 60 изображений, поделенных на 6 категорий (объект вблизи, повернут, затемнен, засвечен, частично закрыт и находится вдалеке), каждая из которых содержала по 10 изображений. В первой выборке фотографии были сделаны на цифровой фотоаппарат и имели реальный размер  $3456 \times 5184$  пикселей, которые затем программно сжимались до размера  $1280 \times 720$ . Во второй тестовой выборке фотографии были сделаны на камеру телефона с разрешением  $1280 \times 720$  пикселей. Примеры изображений из первой и второй выборки представлены на рисунке 3.

Результаты работы подсистемы компьютерного зрения, построенными с применением разных методов распознавания объектов, представлены в таблице 2. В таблице 2 использованы следующие обозначения. № — номер классификатора, совпадающий по значению с номером из таблицы 1;  $n_1 \dots n_6$  — число изображений, на которых правильно был распознан объект (1 — объект вблизи, 2 — объект повернут, 3 — объект затемнен, 4 — объект засвечен, 5 — объект частично прикрыт, 6 — объект вдалеке);  $n$  — общее число изображений, на которых был правильно распознан объект;  $t_{\text{рпн-ср}}$  — средняя длительность распознавания, с.

Как видно из таблицы 2, каскадный классификатор в среднем показывает лучшие результаты при распознавании фигуры «Треугольник» с точки зрения количества правильно распознанных объектов. При

Таблица 1. Параметры обучения классификатора Хаара

№	Выборка	N	FAR, %	Длительность обучения, с	№	Выборка	N	FAR, %	Длительность обучения, с
1	«Большая»	7	10	467	6	«Малая»	7	1	302
2	«Большая»	10	20	562	7	«Малая»	10	20	295
3	«Большая»	15	40	801	8	«Малая»	10	10	380
4	«Малая»	7	10	208	9	«Малая»	15	20	466
5	«Малая»	7	5	295	10	«Малая»	15	40	499

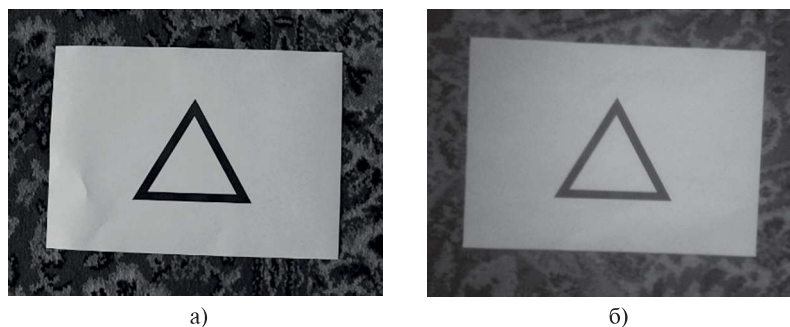


Рис. 3 – Примеры изображений из тестовых выборок: а – цифровой фотоаппарат; б – камера телефона

Таблица 2. Результаты распознавания объекта с использованием двух методов распознавания

№	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$	$n$	$t_{\text{рпн\_ср}}, \text{с}$
<b>OpenCV</b>								
<b>Фот-ат</b>	8	5	7	9	4	4	37	0,245
<b>Телефон</b>	9	8	1	9	1	1	29	0,043
<b>Классификатор Хаара</b>								
Цифровой фотоаппарат								
<b>1</b>	10	6	7	10	3	9	45	0,273
<b>2</b>	8	7	5	7	3	10	40	0,275
<b>3</b>	10	9	6	9	4	8	46	0,272
<b>4</b>	9	6	9	8	4	8	44	0,273
<b>5</b>	10	10	6	9	4	10	49	0,272
<b>6</b>	10	8	10	8	2	10	48	0,272
<b>7</b>	7	3	4	6	5	4	29	0,272
<b>8</b>	10	6	9	9	3	9	46	0,268
<b>9</b>	8	4	2	7	5	7	33	0,27
<b>10</b>	10	6	5	8	4	10	43	0,27
Телефон								
<b>1</b>	9	6	4	8	5	8	40	0,077
<b>2</b>	7	5	6	6	4	8	36	0,078
<b>3</b>	8	5	6	5	4	9	37	0,075
<b>4</b>	6	8	8	5	4	9	40	0,068
<b>5</b>	8	6	4	4	3	8	33	0,075
<b>6</b>	8	6	6	7	4	9	40	0,07
<b>7</b>	4	6	7	4	2	9	32	0,073
<b>8</b>	8	8	6	5	3	9	39	0,075
<b>9</b>	6	4	6	7	4	9	36	0,075
<b>10</b>	7	5	5	5	4	9	35	0,073

этом разница во времени распознавания составляет приблизительно 35 мс.

Если сравнивать обученные классификаторы, то лучшие результаты показал каскад, обученный на «Малой» выборке с числом стадий обучения равным 7 и значением FAR = 1 %.

Также хорошие результаты показал каскад с числом стадий обучения равным 10 и FAR = 10 % и каскад с «Большой» выборкой, числом стадий обучения равным 15 и FAR = 40 %.

Результаты позволяют сделать вывод о том, что с увеличением обучающей выборки имеет смысл увеличивать число стадий обучения с одновременным увеличением показателя FAR, либо уменьшать число стадий обучения с одновременным уменьшением показателя FAR. Однако, при этом, каждый рассматриваемый случай требует собственной подстройки параметров обучения.

#### Заключение

Создание подсистем технического зрения мобильных роботов может быть осуществлено при использовании метода, использующего стандартные функции бесплатной библиотеки обработки изображения и компьютерного зрения OpenCV, а также с использованием заранее обученного классификатора Хаара.

К достоинствам варианта построения на основе OpenCV можно отнести большое число различных настроек, регулировка которых может улучшить качество распознавания. Недостатком является большая зависимость от качества освещения сцены. Засвет или затемнение объекта приводят к ухудшению процесса поиска, поэтому требуется дополнительная подстройка алгоритма распознавания.

Достоинства каскадного классификатора Хаара заключаются в более высокой точности распознавания, чем при применении OpenCV. Но следует отметить, что качество распознавания существенно зависит от сформированных обучающих выборок и параметров обучения. Данный метод имеет неплохую устойчивость к шумам и разного рода помехам на изображении, а также меньший по сравнению с первым методом размер программируемого кода. Недостаток метода Хаара — это необходимость формирования выборок позитивных и негативных изображений, которые для получения качественной системы распознавания должны быть больших объемов.

Таким образом, если вычислительное устройство, используемое для обучения, не обладает значительной вычислительной мощностью, позволяющей обучить классификатор, а также нет проблем с равномерным освещением рабочей области, то рекомендуется использовать бесплатную библиотеку OpenCV для построения системы технического зрения робота. Если имеются проблемы, обусловленные неравномерным освещением рабочей области, а также есть возможность создания обучающих выборок позитивных и негативных изображений на каждый распозна-

ваемый объект, то имеет смысл использовать каскадный классификатор Хаара.

Дальнейшее совершенствование систем технического зрения роботов требует изучения более сложных методов и алгоритмов распознавания объектов, таких как, например, сверточные нейронные сети и глубокое обучение в совокупности с использованием нескольких источников видеосигнала и карт глубин.

#### Библиографический список

1. **Porto Marques, Tunai & Hamano, Fumio.** (2017). Autonomous robot for mapping using ultrasonic sensors. 1–6. 10.1109/IGESC.2017.8283450.
2. **Molder, Cristian & Toma, Daniel & Țigău, Andrei.** (2019). Navigation Algorithms with LIDAR for Mobile Robots. Journal of Military Technology. 2. 5–10. 10.32754/JMT.2019.1.01.
3. **Schouten, Girmi & Steckel, Jan.** (2019). A Biomimetic Radar System for Autonomous Navigation. IEEE Transactions on Robotics. PP.1–10. 10.1109/TRO.2018.2889577.
4. **Suescún, César & Enciso-Aragon, Carlos & Moreno, Robinson.** (2020). Robotic navigation algorithm with machine vision. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 10. 1308. 10.11591/ijece.v10i2.pp1308-1316.
5. **Satya Widodo, Nuryono & Pamungkas, Anggit.** (2020). Machine Vision-based Obstacle Avoidance for Mobile Robot. Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika. 5. 77. 10.26555/jiteki.v5i2.14767.
6. **Blok, Pieter & Barth, Ruud & Van den Berg, Wim.** (2016). Machine vision for a selective broccoli harvesting robot. IFAC-PapersOnLine. 49. 66–71. 10.1016/j.ifacol.2016.10.013.
7. **Peña-Cabrera, Mario & Lopez-Juarez, I. & Rios-Cabrera, Reyes & Corona, Jorge.** (2005). Machine vision approach for robotic assembly. Assembly Automation. 25. 204–216. 10.1108/01445150510610926.
8. **AI & Robotics: 3 Trends to Keep an Eye On** [Электронный ресурс] // robotics.org URL: <https://www.robotics.org/blog-article.cfm/AI-Robotics-3-Trends-to-Keep-an-Eye-On/89> (дата обращения: 25.12.2020).
9. **Mahankali, Naveenkumar & Ayyasamy, Vadivel.** OpenCV for Computer Vision Applications. Proceedings of National Conference on Big Data and Cloud Computing (NCBDC'15), March 20, 2015.
10. **Çerezci, Feyza & Kazan, Serap & Oz, Muhammed & Oz, Cemil & Tasci, Tugrul & HIZAL, Selman & Altay, Çağlayan.** Online Metallic Surface Defect Detection Using Deep Learning, 2021.
11. **Ю.В. Илюхин, А.А. Топорин.** Интеллектуальное управление мобильным роботом в среде с препятствиями на основе нечёткой логики // Вестник МГТУ «СТАНКИН» № 1 (56), 2021. С. 67–74.

12. OpenCV Official Site [Электронный ресурс] // [opencv.org](https://opencv.org/) URL: <https://opencv.org/> (дата обращения: 05.12.2020).

13. **John Canny**. A computational approach to edge detection [Текст] // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. –1986. –V. 8, No 6. –P. 679–698.

14. Обучение каскада Хаара на примере поиска символов автомобильного номера OpenCV [Электронный

ресурс] // [kostyakulakov.ru/opencv-обучение-каскада-хаара/](https://kostyakulakov.ru/opencv-обучение-каскада-хаара/) URL: <https://kostyakulakov.ru/opencv-обучение-каскада-хаара/> (дата обращения: 18.01.2021).

15. Выделение объектов на изображении по методу Виолы-Джонса (Object selection in the image according to the Viola-Jones method) [Электронный ресурс] // [api-2d3d-cad.com](https://api-2d3d-cad.com) URL: <https://api-2d3d-cad.com/viola-jones-method/> (дата обращения: 18.01.2021).

**Илюхин Юрий Владимирович** – д-р техн. наук, проф. кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[ilyv\\_178@rambler.ru](mailto:ilyv_178@rambler.ru)

**Топорин Андрей Александрович** – аспирант кафедры робототехники и мехатроники ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
[zator96@yandex.ru](mailto:zator96@yandex.ru)

**Лукхин Юрий Владимирович** – D. Sc. in Engineering, Professor of the sub department «Robotics and Mechatronics» of MSUT «STANKIN»  
[ilyv\\_178@rambler.ru](mailto:ilyv_178@rambler.ru)

**Топорин Андрей Александрович** – Postgraduate of the sub department «Robotics and Mechatronics» of MSUT «STANKIN»  
[zator96@yandex.ru](mailto:zator96@yandex.ru)

---

## ВЫБОР МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ОПТИМАЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

### SELECTION OF A MANIPULATION SYSTEM WITH AN OPTIMAL KINEMATIC STRUCTURE

*В статье изложена методика геометрического синтеза элементов кинематической структуры распределительного устройства построения движений манипулятора с помощью разработанных функций, которые позволяют решать задачи управления ориентацией и позиционированием стрел и схвата спецтехники, которая используется для решения задач на крупных строительных площадках промышленной индустрии. Дана оценка возможностей задействованного рабочего пространства манипуляционной системы при выполнении технологических операций в пространстве, использованных кинематический коэффициент.*

*The article describes the method of geometric synthesis of the elements of the kinematic structure of the switchgear for constructing manipulator movements using the developed functions that allow solving the problems of controlling the orientation and positioning of arrows and grabbing special equipment, which is used to solve problems at large construction sites of the industrial industry. An assessment of the capabilities of the involved working space of the manipulation system is given when performing technological operations in space, using the kinematic coefficient.*

**Ключевые слова:** строительство, бетонная смесь, манипуляционная система, манипулятор, кинематическая цепь.

**Keywords:** construction, concrete mix, manipulation system, manipulator, kinematic chain.

Описываемый ниже анализ алгоритмов управления рабочими движениями манипулятора выполнен на примере и применительно к создаваемому опытно-макетному образцу подвижного манипулятора. Особенности кинематики таких манипуляторов оказывают сильное влияние на ограничения возможных движений, что заметно расширило функциональный состав алгоритмов для построения требуемых манипуляций. При проектировании манипулятора, предназначенного для распределения бетонной смеси в опалубку бетонируемого монолитного сооружения, необходимо решить ряд задач, связанных с определением наиболее рациональной структуры кинематических соединений, позволяющих максимально расширить их технологические возможности [1].

Для реализации бетонораспределительной системы для локального перемещения бетонной смеси в рабочую зону бетонирования манипуляционная система может иметь две степени подвижности в горизонтальной плоскости здания и одну степень подвижности по вертикали.

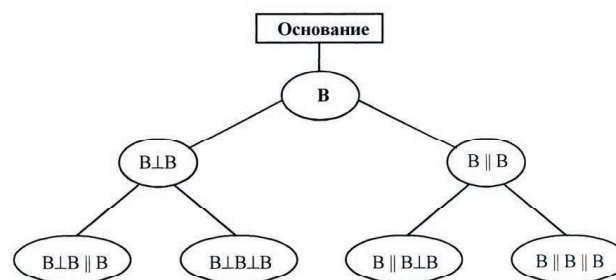
Кинематическая структура манипуляционной системы должна обладать тремя степенями подвижности, позволяя осуществить движение манипулятора в пределах заданной рабочей зоны бетонирования [6].

При реализации кинематической цепи бетонораспределительного манипулятора, использовать по-

ступательные пары сочленений нерационально из-за значительных сопротивлений в них перемещению бетонной массы. Это позволяет ограничиться анализом кинематических цепей бетонораспределительных манипуляторов только с вращательными парами [2].

Кинематические цепи манипуляторов отличаются разнообразием типов, образующих чаще всего перпендикулярные, параллельные, как это показано на рисунке 1.

Возможные принципиальные схемы соединения кинематических звеньев (рисунок 1) позволяют на их основе реализовать возможные трехзвенные структуры. Манипуляционные распределительные системы



**Рис. 1** – Варианты реализации кинематических цепей бетонораспределительной стрелы

бетонирования, состоящие только из пар вращения с тремя степенями вращения в пределах рабочей зоны перемещения распределительной стрелы для укладки бетонной смеси представлены на рисунке 2.

Каждая структура обладает тремя степенями подвижности и характеризуется определенным рабочим пространством, в пределах которого может перемещаться устройство укладки и уплотнения бетонной смеси, закрепленное на конце распределительной стрелы.

Для сравнительного анализа определения наиболее эффективной распределительной стрелы можно использовать такую характеристику манипулятора, как объем его рабочего пространства  $V$ :

$$V_{вд} = \frac{V}{L^3} = const, \quad (1)$$

где  $L$  – полная длина звеньев манипулятора [1, 3.].

Вводя в соотношение (1) коэффициент совершенства  $K$  [4], можно учесть простоту обслуживания их конструкции, минимальные затраты и т. п.

Таким образом, выбор оптимальной кинематической структуры распределительной стрелы, используя алгоритм, представленный на рисунке 3, сводится к выполнению условия:

$$\Phi = K_n \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $K_n$  – нормированный кинематический показатель, который можно вычислить по формуле (3).

$$K_n = \frac{V}{K \times L^3}, \quad (3)$$

Анализ показал, что часть кинематических схем (№ 1, 2, 3, 4, 8, 13, 14, 17) не обеспечивает пространственного перемещения устройства укладки и уплотнения бетонной смеси, изменения его ориентации в рабочем пространстве. Они имеют последовательное соединение звеньев в сочленениях одного типа и для реализации кинематически неприемлемы [2].

Оптимальные кинематические структуры распределительных устройств (схемы № 11 и 12 на рис. 3), имеют максимальный нормированный кинематический показатель равный 2,094.

Кинематическая схема № 11 соответствует оптимальной структуре распределительного устройства (рисунок 4), обладает большой компактностью и в большей степени отвечает требованиям, предъявляемым технологическим процессом распределения бетонной смеси при бетонировании монолитных зданий [7].

Решение задачи геометрического синтеза звеньев распределительной стрелы сводится к определению оптимальных геометрических характеристик распределительного устройства.

Для оценки возможности выполнения распределительной стрелой операций ориентирования

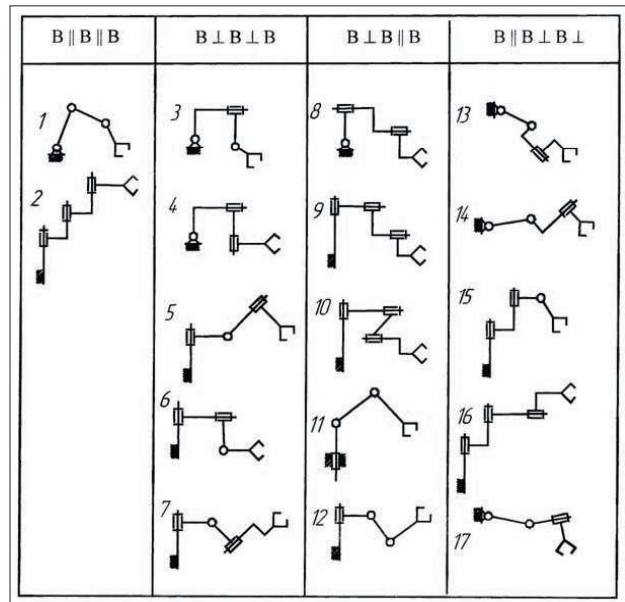
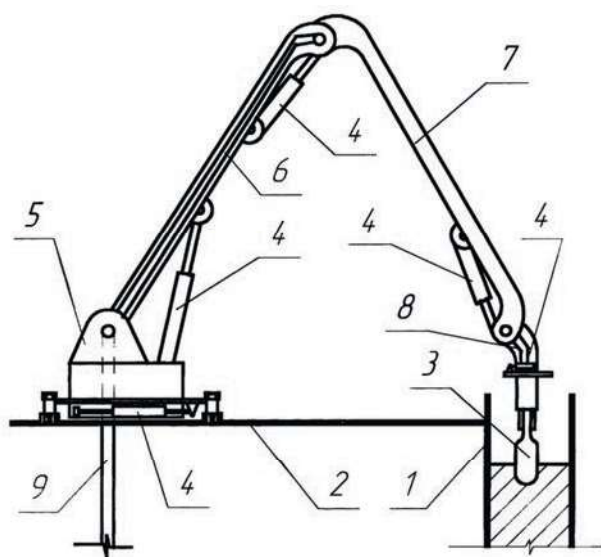


Рис. 2 – Варианты трехзвенных кинематических цепей распределительной стрелы для укладки бетонной смеси



Рис. 3 – Блок-схема алгоритма выбора оптимальной кинематической структуры распределительного устройства



**Рис. 4** – Схема распределительного устройства оптимальной кинематической структуры: 1 – опалубка стен; 2 – рабочий настил опалубки; 3 – устройство укладки и уплотнения бетонной смеси; 4 – гидроцилиндры; 5 – поворотная стойка; 6 – корневая секция; 7 – средняя секция; 8 – концевая секция; 9 – бетоновод

устройства укладки и уплотнения бетонной смеси в заданной точке рабочего пространства используется понятие манипулятивности [2, 9], количественная оценка которого определяется коэффициентом сервиса:

$$\Omega = \frac{(l_2 + l_3)^3 - (|l_2 - l_3|)^3}{(l_2 + l_3 + l_4)^3}, \quad (4)$$

где  $l_2, l_3, l_4$  длины корневой, средней и концевой секций.

Из анализа выражения (4) можно сделать следующие выводы:

- коэффициент сервиса не зависит от высоты поворотной стойки  $l_1$ .
- длина концевой секции должна определяться конструктивными решениями распределительной стрелы и быть минимальной по размеру;
- при фиксированной длине концевой секции  $l_4$ , максимальный сервис для пространственного четырехзвенника, обеспечивается при точном равенстве длин корневой ( $l_2$ ) и средней секций ( $l_3$ ) распределительной стрелы.

Максимальная граница зоны полного сервиса для распределительного устройства, показанного на рисунке 4, определяется из выражения [10]:

$$R_{\max} = (l_2 + l_3) - (l_4 + l_5), \quad (5)$$

где  $l_5$  – высота устройства укладки.

При условии равенства длин секций  $l_2$  и  $l_3$  выражение (5) примет вид:

$$l_2 = l_3 = \frac{R + (l_4 + l_5)}{2} \quad (6)$$

где  $R$  – расстояние от места установки основания распределительной стрелы до наиболее удаленной точки бетонирования.

На основании разработанной методики можно осуществлять подбор оптимальных геометрических параметров (длин звеньев) распределительного устройства для конкретных условий заданного технологического процесса бетонирования.

### Библиографический список

1. Указания по применению роботов и манипуляторов в строительстве / ЦНИИОМТП. – М.: Стройиздат, 1987. – 55 с.
2. Артоболевский И.И., Кобринский А.Е. Робототехника: Современное состояние и проблемы // Вестник АН СССР. – 1974. – № 9. – С. 32 – 45.
3. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории – М.: Наука, 1985. – 344 с.
4. Илюхин А.В., Марсов В.И., Бокарев Е.И. Особенности построения математической модели структуры композиций с элементами сферической формы // Вестник МАДИ. – 2012. – № 2. – С. 123–125.
5. Марсов В.И., Бокарев Е.И., Тихонов А.Ф. Сравнительная оценка весовых транспортеров дозаторов непрерывного действия // Механизация строительства. – 2010. – № 2. – С. 13–16.
6. Илюхин А.В., Марсов В.И., Васильев Ю.Э., Бокарев Е.И. Автоматизированные технологии в приготовлении бетонной смеси // Сборник научных трудов кафедры АСУ. – М.: МАДИ, 2012. – 120 с.
7. Артемьева Т.В., Лысенко Т.М., Румянцев А.Н., Стесин С.П. Гидравлика, гидромашины и гидропривод: Учебник / – М.: Академия, 2014. – 352 с.
8. Богданов М.Р. Применения GPS/ГЛОНАСС: учеб. Пособие / МО., ИД «Интеллект». 2012. – 136 с.
9. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов: учебное пособие / – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 177 с.
10. Шахворостов С.А. Технические средства автоматизации: учеб. Пособие / – М.: МАДИ, 2011. – 109 с.



**Макаров Александр Дмитриевич** – старший преподаватель кафедры строительных конструкций Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ)  
*ad.makarov@mail.ru*

**Марсов Вадим Израилевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизации производственных процессов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)  
*evmarsova@rambler.ru*

**Марсова Екатерина Вадимовна** – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры автоматизации производственных процессов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)  
*evmarsova@rambler.ru*

**Джабраилов Хизар Абубакарович** – канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации производственных процессов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)  
*khizarnauka@mail.ru*

**Антонова Елена Олеговна** – инженер кафедры автоматизации производственных процессов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)  
*snatxes@gmail.com*

**Makarov Alexander Dmitrievich** – senior lecturer of the department «Building structures» Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
*ad.makarov@mail.ru*

**Marsov Vadim Izrailevich** – Doctor of Engineering Sciences, professor, professor at the department of «Automation of production processes» Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)  
*evmarsova@rambler.ru*

**Marsova Ekaterina Vadimovna** – Doctor of Engineering Sciences, professor, associate professor at the department of «Automation of production processes» Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)  
*evmarsova@rambler.ru*

**Dzhabrailov Khizar Abubakarovich** – candidate of engineering sciences, associate professor at the department of «Automation of production processes» Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)  
*khizarnauka@mail.ru*

**Antonova Elena Olegovna** – research assistant of «Automation of production processes» Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)  
*snatxes@gmail.com*

---

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

### INFORMATION SUPPORT OF THE TRAJECTORY OF MOVEMENT OF A MOBILE ROBOT IN A LIMITED SPACE

*В статье представлены результаты моделирования процесса движения робота в условиях производственного склада. Для решения задачи проведен обзор наиболее распространенных информационно-измерительных систем и обоснован их выбор. Разработан алгоритм использования сенсорной информации, реализованный в виде программы для контроллера. В дальнейшем предполагается связать подбор коэффициентов ПИД-регулятора с сенсорной информацией, что позволит обеспечить более плавную и точную траекторию движения робота.*

*This article presents the results of modeling the process of robot movement in a production warehouse environment. To solve the problem, a review of the most common information-measuring systems was carried out and their choice was justified. An algorithm for using sensor information, implemented in the form of a program for the controller, has been developed. In the future, it is expected to connect the selection of PID controller coefficients with the sensor information, which will provide a smoother and more accurate motion pathway of the robot.*

**Ключевые слова:** мобильный робот, сенсоры, информационно-измерительные устройства, дальномеры, позиционирование в пространстве, ориентация на местности.

**Keywords:** mobile robot, sensors, information and measuring devices, rangefinders, positioning in space, orientation on the ground.

В условиях цифрового производства сбор информации о состоянии объектов и процессов — важнейшее условие автоматизации. Автоматизированный процесс предполагает использование робототехнических комплексов (РТК) — сварочных, сборочных, складских роботов и т.д. Важной частью информационно-измерительной системы РТК являются сенсорные элементы. Их задача заключается в получении сигналов о внешнем и внутреннем состоянии объектов и процессов, и в дальнейшем преобразовании и использовании сигналов в системах управления. Сенсорные системы позволяют роботу реагировать на изменение внешних условий и принимать простые решения самостоятельно. В данном исследовании в качестве объекта выбрана модель мобильного робота, который имитирует движение на производственном складе.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ наиболее распространенных информационно-измерительных устройств, используемых в производственных системах

В мобильной робототехнике часто ставятся задачи ориентации и позиционирования робота в пространстве. Средством получения этой информации являются информационно-измерительные устройства (сенсоры), передающие данные контроллеру.

Рассмотрим различные способы определения расстояния до возможного препятствия. Типы дальнометров представлены на рис. 1.

В данном исследовании для определения расстояния до возможных статических и динамических препятствий выбран ультразвуковой датчик. В рамках поставленной задачи робот передвигается в помещении по лабиринту, состоящему из черных пересекающихся линий на белом поле. По ходу движения робота расставлены модели препятствий, материал которых не поглощает звук. Исходя из приведенных характеристик внешней среды целесообразно использовать сонар. Нет необходимости применять дорогостоящий лидар, неспособный хранить большой объем данных. В данном случае точности аппарата, работающего на ультразвуке, будет достаточно. В сравнении с инфракрасным датчиком можно уверенно сказать, что характеристики ультразвукового датчика существенно лучше, а цена примерно одинаковая.

Корректировка движения (следование по заданной траектории) осуществляется в соответствии с рис. 2.

Обеспечение перемещения робота по заданной траектории возможно при помощи различных информационно-измерительных устройств. Учитывая особенности рабочей зоны, датчик цвета неприменим,

Таблица 1. Информационно-измерительные устройства

1	Достоинства	Недостатки
2D/3D сканирующие лазерные дальномеры (лидары)	Быстрота и точность сбора информации Не зависит от яркости света, возможность эксплуатации в любое время суток Изображение высокого разрешения Высокая точность измерения расстояния	Проблема восприятия отражающих и рельефных покрытий Малая надежность из-за наличия вращающегося элемента Высокая стоимость
GPS/GLONASS	Поддержание системы другими устройствами	Низкая точность в помещении Требуется прямая видимость Высокая стоимость
RFID метки	Индивидуальность каждой метки Возможность хранения информации больших объемов Большой диапазон чтения	Высокий риск повреждения поверхности (влагой / загрязнением) При радиопоглощающих объектах рабочие характеристики становятся низкими
Акселерометр	Небольшие габариты Легкая конструкция Низкая стоимость	При неподвижном состоянии данные акселерометра не точные Невысокая точность
Гироскоп	Помехоустойчивость Точное определение углов по трем осям Средняя стоимость	Сложная конструкция Накапливаемая ошибка
Тактильные датчики	Простота в использовании Надежность Невысокая стоимость	Ограниченное расстояние измерения
Датчик освещенности	Простота и доступность	Низкая скорость реагирования на изменение количества света Повышенная чувствительность
Датчик цвета	Чувствительность к спектру цветов	Низкая скорость реагирования
Инфракрасный датчик	Компактность Небольшая стоимость Простота в использовании	Высокая чувствительность Проблема восприятия поглощающих поверхностей (черная и зеркальная)
Компас	Точность измерения Малые габариты Электронная версия компаса уменьшает накопленные ошибки углов	Стоимость компаса зависит от его точности
Стереокамеры	Информация предоставляется достаточно подробно	Сложное использование Сложное программирование Требуется большой объем памяти для обработки полученной информации
Ультразвуковой датчик расстояния	Измерение диапазона в нескольких метрах Датчик удобно применять для огибания препятствия за счет измерения расстояния до объекта Невысокая стоимость	Проблема восприятия поглощающих поверхностей (тонкая и ворсистая)
Энкодер	Магнитный принцип Предназначен для ориентации и позиционирования робота в пространстве Низкая стоимость	Накапливаемая ошибка Низкая частота обработки одометрии Ошибка подсчета импульсов от энкодеров

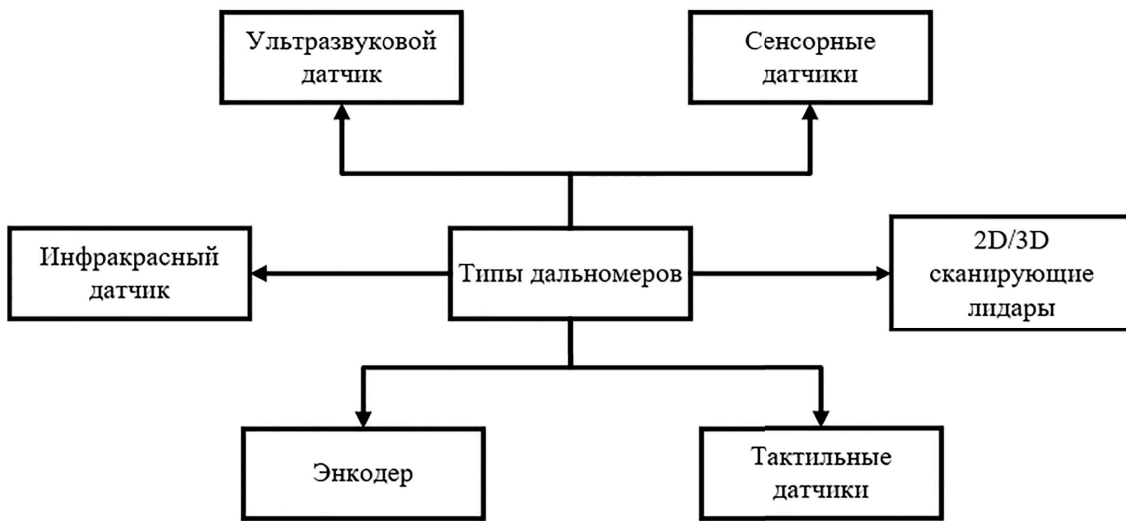


Рис. 1 – Типы дальномеров



Рис. 2 – Корректировка движения

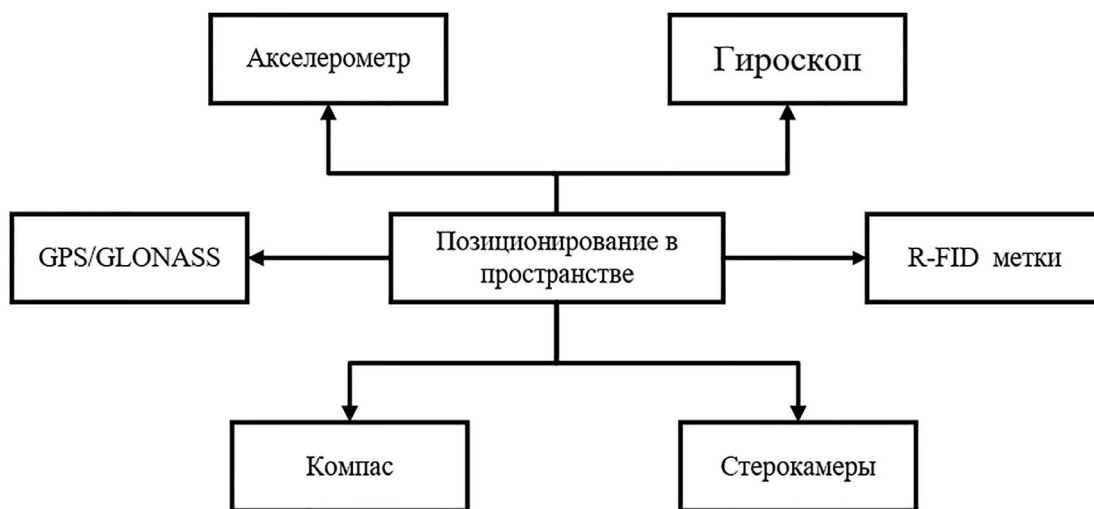


Рис. 3 – Позиционирование в пространстве

так как ограничен градиент распознавания цвета. ИК-датчик имеет сравнительно малый процент погрешности относительно датчика освещенности.

Движение мобильного робота обеспечивается с помощью двух инфракрасных датчиков, установленных вдоль границ черной линии. Плавность движения и регулирование скорости моторов обеспечивает ПИД-регулятор.

Позиционирование в пространстве производится с использованием устройств, показанных на рис. 3.

Локализация мобильных роботов реализуется различными способами. В заданных условиях применение в качестве датчика положения GPS маяка не рационально. Погрешность GPS-трекеров, которая может достигать до 4 метров, является большой в условиях рабочей среды мобильного робота. Для позиционирования робота на небольшой площади склада предпочтительнее использовать гироскоп или акселерометр. Гироскоп рассчитывает угол поворота относительно своей оси, что позволяет получить сведения о его положении в пространстве (с учетом ориентации на конечную точку). Акселерометр определяет ускорение, воздействующее на датчик. Безусловно, два этих датчика являются взаимозаменяемыми, но, к сожалению, точность таких измерений будет достаточно низкой. Наилучшим вариантом в данной работе будет совместное использование гироскопа и акселерометра. Так устраняются взаимные недостатки, показания датчика становятся стабильными и не подвергаются случайным ускорениям.

Таким образом, для решения задачи выбраны следующие датчики:

- 1) ультразвуковой датчик для определения расстояния до возможных препятствий;
- 2) два инфракрасных датчика для обеспечения движения по траектории;
- 3) гироскоп совместно с акселерометром для определения текущего положения робота.

Для моделирования процесса передвижения робота на складе используем мобильный трехколесный робот, который передвигается по известной траектории (рис. 4).

Задача робота – пройти из точки А в точку В по кратчайшему пути с учетом ограничений (наличие препятствий). Для решения задачи использован алгоритм А\*.

Исходные данные процесса:

- известная карта маршрута с вариантами объезда препятствий;
- статические препятствия;
- динамические препятствия.

Этапы решения задачи:

- все сенсоры постоянно считывают информацию;
- робот едет по траектории, используя сигналы инфракрасного датчика, до момента получения информации от ультразвукового датчика о наличии препятствия в зоне видимости;

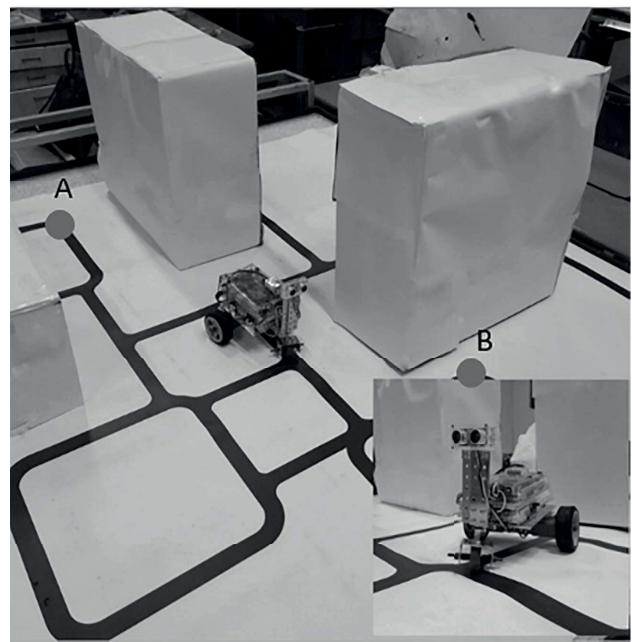


Рис. 4 – Практическая реализация задачи

- с помощью гироскопа робот определяет текущее направление движения (в точку В) и корректирует маршрут по алгоритму А\*;
- далее процесс повторяется.

Схема, поясняющая решение задачи управления движением робота, показана на рис. 4.

При помощи двух инфракрасных датчиков, направленных на границы черной линии, мобильный робот корректирует свое движение. Сенсоры располагаются на нижней части мобильной платформы.

Программирование контроллера робота выполнено на языке Arduino C, который является языком C++ с фреймворком Wiring. Часть программного кода, обеспечивающего управление мобильным роботом при его движении по черной линии, приведена ниже на рис. 5.

Измерение расстояния до препятствий осуществляется при помощи ультразвукового датчика в диапазоне от 2 до 300 см. В данной конструкции сенсор располагается горизонтально, что позволяет двигаться устройству с максимальным углом обзора. Для управления мобильным роботом при возникновении препятствия используется код, приведённый на рис. 6.

Ориентация и позиционирование робота реализуется с помощью комбинации акселерометра и гироскопа, используя усредненные значения (рис. 7).

Результаты проведенного исследования подтверждают возможность имитировать реальные процессы передвижения мобильного робота при его работе в условиях склада. Выполненный анализ информационно-измерительных устройств позволяет делать их обоснованный выбор для решения задачи движения

```

if ( ( ( ( ( irAnalog(IN3) / irAnalog(IN4) ) ) >= ( 0.41 ) ) &&
( ( ( irAnalog(IN3) / irAnalog(IN4) ) ) <= ( 0.51 ) ) ) && irWhite(IN4, 196) ))
{
  startMotor(2, 80);
  startMotor(3, 40);
}
else
{
  if ( ( ( ( ( irAnalog(IN4) - irAnalog(IN3) ) ) >= ( 35 ) ) ||
( ( ( irAnalog(IN3) / irAnalog(IN4) ) ) >= ( 0.75 ) ) && ( ( ( irAnalog(IN3) / irAnalog(IN4) ) ) <= ( 0.92 ) ) ) ) )
  {
    startMotor(2, 80);
    startMotor(3, -80);
  }
  else
  {
    if ( ( ( ( ( irAnalog(IN3) - irAnalog(IN4) ) ) >= ( 0 ) ) ||
( ( ( irAnalog(IN3) / irAnalog(IN4) ) ) >= ( 0.99 ) ) && ( ( ( irAnalog(IN3) / irAnalog(IN4) ) ) <= ( 1.7 ) ) ) ) )
    {
      startMotor(2, -80);
      startMotor(3, 80);
    }
    else
    {
      if ( ( irWhite(IN4, 220) && irWhite(IN3, 185) ) )
      {
        startMotor(2, -55);
        startMotor(3, -55);
      }
      else
      {
        if ( ( irBlack(IN4, 185) && irBlack(IN3, 160) ) )
        {
          startMotor(2, 55);
          startMotor(3, 55);
        }
      }
    }
  }
}

```

Рис. 5 – Управление мобильным роботом при движении по черной линии

```

if ( ( ( distanceCM( IN1 ) ) >= ( 15 ) ) ) // если расстояние больше или равно 15 см
{
  startMotor(1, 40); // 40-мощность моторов
  startMotor(2, 40);
}
else // иначе
{
  startMotor(1, -40); // -40-мощность моторов
  startMotor(2, 40);
}

```

Рис. 6 – Управление мобильным роботом при возникновении препятствия

```

if ( irBlack(IN4, 137) && irBlack(IN3, 120) )
{
  switch (readAccelAngle('x', RAW_GYRO))
  {
    case ( >= 85 ):
      startMotor(2, -100);
      startMotor(3, 100);
      delay( 1000 );
      break;
    case ( >= -10 && <= 10 ):
      startMotor(2, 100);
      startMotor(3, 100);
      delay( 1000 );
      break;
    case ( <= -85 ):
      startMotor(2, 100);
      startMotor(3, -100);
      delay( 1000 );
      break;
  }
}

```

Рис. 7 – Выбор направления для следования по заданной траектории

робота в конкретных условиях. В процессе исследования выявлены проблемы, связанные с регулированием параметров движения, а именно с подбором коэффициентов ПИД-регулятора для обеспечения более точного и плавного перемещения. В дальнейшем необходимо разработать алгоритм подбора коэффициентов ПИД-регулятора с учетом сенсорной информации.

### Библиографический список

1. **Евдокимова Т.С., Синодкин А.А., Федосова Л.О., Тюриков М.И.** Система позиционирования и идентификации мобильной робототехнической платформы в ограниченном и открытом пространстве / Т.С. Евдокимова, А.А. Синодкин, Л.О. Федосова, М.И. Тюриков — НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород, 2018. № 2 (121).

2. **Евдокимова Т.С., Синодкин А.А., Федосова Л.О., Тюриков М.И.** Алгоритм построения глобальной траектории движения и планирования маршрута автоматической парковки беспилотного транспортного средства / Т.С. Евдокимова, А.А. Синодкин, Л.О. Федосова, М.И. Тюриков — «Вестник МГТУ «Станкин» № 4 (55), 2020.

3. **T.S. Evdokimova, A.A. Sinodkin, M.I. Tiurikov, L.O. Fedosova and A.V. Kalyashina** Developing an unmanned vehicle local trajectory using a reinforcement learning algorithm/ T.S. Evdokimova, A.A. Sinodkin, M.I. Tiurikov, L.O. Fedosova and A.V. Kalyashina — IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.

4. Сайт / Роботрек Вики// Роботрек Вики. — 2020. — URL: <http://robotrack-rus.ru/wiki/ehlektronika/trekduino/> (дата обращения: 25.04.2021). — Текст: электронный.

5. **Кучерский Р.В.** Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота / Р.В. Кучерский, С.В. Манько // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012.

6. Сравнение точности позиционирования робототехнических комплексов различных конструкций / Каляшина А.В., Гусев Р.Н., Моисеева Е.А. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. Т. 74. № 3. С. 66–70.

7. **Каляшина А.В., Смирнов Ю.Н., Зиганшин Э.Ш.** Интеграция автоматизированных систем управления как один из факторов повышения эффективности работы машиностроительного предприятия // «Вестник МГТУ «Станкин» № 1 (56), 2021.

**Евдокимова Татьяна Сергеевна** — аспирант кафедры автоматизации и управления Казанского национального исследовательского технического университета — КАИ им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)  
*evdokimovats97@gmail.com*

**Каляшина Анна Викторовна** — канд. техн. наук, доц. кафедры лазерных технологий Казанского национального исследовательского технического университета — КАИ им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)  
*anna\_vik@mail.ru*

**Фаткуллина Лиана Фаилевна** — студент кафедры автоматизации и управления Казанского национального исследовательского технического университета — КАИ им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)  
*l.fatkullina@bk.ru*

**Валиева Диана Зиннуровна** — студент кафедры автоматизации и управления Казанского национального исследовательского технического университета — КАИ им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)  
*dvalieva99@mail.ru*

**Evdokimova Tatyana Sergeevna** — postgraduate student of the Department of automation and control Technologies of KNRTU KAI  
*evdokimovats97@gmail.com*

**Kalyashina Anna Victorovna** — candidate Sc. of Engineering, professor, Department of Laser Technologies of KNRTU KAI  
*anna\_vik@mail.ru*

**Fatkullina Liana Failevna** — student of the Department of Automation and Control of KNRTU-KAI  
*l.fatkullina@bk.ru*

**Valieva Diana Zinnurovna** — student of the Department of Automation and Control of KNRTU-KAI  
*dvalieva99@mail.ru*